

CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE UN HORMIGÓN GEOPOLIMÉRICO CURADO POR CO₂.

SARAH MARÍA LÓPEZ VELÁSQUEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera civil

Jose William Restrepo Montoya

Ingeniero Metalúrgico, PhD.



**UNIVERSIDAD EIA
INGENIERÍA CIVIL
ENVIGADO
2019**

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a mis padres por siempre estar ahí para mí y ser mi apoyo durante mi carrera. A mi hermana por siempre alentarme a continuar con mis estudios y nunca desfallecer. A Daniel Suárez por ser mi apoyo incondicional y ayudarme siempre que lo necesité. Por último, a la Universidad EIA, en especial a mi director de carrera y su asistente, por ayudarme siempre.

CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. PRELIMINARES.....	11
2.1 Planteamiento del problema	11
2.2 Objetivos del proyecto	13
2.2.1 Objetivo General.....	13
2.2.2 Objetivos Específicos	13
2.3 Marco de referencia.....	14
2.3.1 Antecedentes	14
2.3.2 Marco teórico.....	20
3. METODOLOGÍA.....	22
3.1 Obtención de las materias primas.....	22
3.1.1 Ceniza volante.....	22
3.1.2 Arena.....	22
3.1.3 Silicato de sodio	23
3.1.4 Hidróxido de sodio.....	24
3.2 Procedimiento de preparación de la mezcla	25
3.3 Preparación de la solución alcalina.....	28
3.4 Preparación del geopolímero.....	30
3.5 Procedimientos de curado	32
3.5.1 Curado ambiental	32
3.5.2 Curado por carbonatación con CO ₂	32
3.5.3 Curado térmico	34

3.6	Ensayos de caracterización del hormigon geopolimérico.....	36
4.	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	37
4.1	Ensayo de resistencia a la compresión.....	37
4.2	Variación de masa.....	42
4.3	Contracción volumétrica	43
4.4	Ensayo de absorción de humedad.....	44
5.	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	47
	REFERENCIAS	49
	ANEXOS	52

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Dosificación	25
Tabla 2. Cantidades de los materiales en la dosificación	27
Tabla 3. Comparación porcentajes de absorción de humedad.....	45

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. investigaciones realizadas por Año.....	16
Figura 2. Investigaciones realizadas por Instituciones	18
Figura 3. Investigaciones realizadas por País.....	19
Figura 4. Proceso de clasificación granulométrica de la arena.....	23
Figura 5. Granulometría de la arena utilizada	23
Figura 6. Materias primas.	24
Figura 7. Procedimiento de preparación del hidróxido de sodio	28
Figura 8. Diagrama de proceso solución alcalina.....	29
Figura 9. Solución activadora.....	29
Figura 10. Diagrama de proceso de geopolimerización	30
Figura 11. Procedimiento de mezclado.....	31
Figura 12. Colocación en moldes.....	31
Figura 13. Cámara de curado ambiental.....	32
Figura 14. Cámara de carbonatación del CIDEMAT.	34
Figura 15. Horno de curado térmico.....	34
Figura 16. Diagramas de proceso de los diferentes métodos de curado.....	35
Figura 17. Variación de la resistencia a compresión del hormigón geopolimérico en función del tipo y edad de curado.....	37
Figura 18. Fallas de las muestras	40
Figura 19. Superficies de fractura.	41
Figura 20. Variación de masa en las muestras	43
Figura 21. Variación volumétrica de las muestras.....	44

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO 1. Caracterización de la ceniza volante utilizada.	52
ANEXO 2. Ficha técnica ceniza volante.....	54
ANEXO 3. Ficha técnica silicato de sodio.	55
ANEXO 4. Hoja de seguridad silicato de sodio.	57
ANEXO 5. Ficha técnica hidróxido de sodio.....	63
ANEXO 6. Tablas de resultados de resistencia a la compresión.....	64
ANEXO 7. Variación gravimétrica curado térmico.	65
ANEXO 8. Variación gravimétrica curado ambiental.	66
ANEXO 9. Variación gravimétrica curado por carbonatación de CO ₂	67
ANEXO 10. Variación volumétrica curado térmico.	68
ANEXO 11. Variación volumétrica curado ambiental.	69
ANEXO 12. Variación volumétrica curado por carbonatación de CO ₂	70

RESUMEN

En los últimos años la industria de la construcción busca innovar con la creación de nuevos materiales de construcción más amigables con el ambiente y económicos a su vez, de esta búsqueda constante por innovar han resultado los hormigones geopoliméricos. Según el químico Joseph Davidovits (1994), estos hormigones cumplen con la expectativa de innovación debido a que son materialmente amigables con el ambiente y logran mejores resultados comparado con el concreto convencional (Davidovits, 1994). Por lo anterior, realizar investigaciones sobre los hormigones geopolimérico se ha convertido en una tendencia creciente. En este trabajo de grado se describe y analiza la variación de algunas propiedades físicas y mecánicas de un hormigón geopolimérico elaborado con ceniza volante activada alcalinamente con una solución de hidróxido de sodio 14M y adicionando silicato de sodio líquido como fuente complementaria de sílice. Se menciona, en primera instancia, la problemática a tratar desde su concepción hasta sus posibles soluciones, lo que implica el desarrollo de una metodología definida de estudios de casos. Los estudios realizados en este trabajo dan cuenta de los resultados obtenidos en ensayos de resistencia a la compresión, variación gravimétrica, variación volumétrica y absorción de agua. Finalmente, los resultados comparativos, las posibles causas de error y análisis para procesos a posteriori son presentados y discutidos.

Palabras clave: Hormigón geopolimérico, Ceniza volante, Activación alcalina, Curado térmico, Curado por carbonatación con CO₂, Resistencia a la compresión.

ABSTRACT

In recent years the construction industry has been looking to innovate with creation of new construction materials more ecofriendly while being economic. From this incessant research to innovate has been developed the geopolymer concrete. According to chemist Joseph Davidovits (1994) these materials fulfill the expectative of innovation due to it being ecofriendly and having better results when compared with conventional concretes (Davidovits, 1994). Because of this, research made about this material has been growing up as a trend in construction industry. This thesis describes and analyzes some physical and mechanical properties variations of a geopolymer concrete fabricated with fly-ash alkali activated with a solution of Sodium hydroxide 14M and adding liquid Sodium Silicate as complementary source of Silica. Firstly, the problem is describing from its conception to its possible solutions, which implies a methodology development of study cases. The studies made in this thesis reflects the results of tests such as compression strength, gravimetric analysis, volume variation and water absorption. Finally, comparative results, possible causes of error and analysis of future processes are presented and discussed.

Keywords: Geopolymer concrete, Fly-ash, Alkali activation, Thermal curing, CO₂ carbonation curing, Compression strength.

1. INTRODUCCIÓN

Cada día la industria de la construcción busca innovar con materiales que sean amigables con el ambiente y que a su vez ayude a reducir los impactos medioambientales de una construcción, en esta búsqueda se ha encontrado la forma de sustituir el cemento portland por materiales cementantes más sustentables los cuales en un medio alcalino permiten mejorar cualidades mecánicas de los materiales (Davidovits, 1994) y además se han encontrado diferentes tipos de curado los cuales generan una mayor fijación de los materiales internamente llamado curado por carbonatación de CO_2 (US12374912, 2007).

Una alternativa que es amigable con el ambiente y que puede resolver muchos problemas son los concretos geopoliméricos que pueden ser elaborados con materias primas que para otras industrias son desechos como lo son las cenizas volantes del carbón, escorias de fundición, residuos de construcción y demolición, y tierras residuales inorgánicas. Además, estos geopolímeros presentan ciertas mejoras en las propiedades respecto al concreto convencional (Bakri et al., 2013), sin embargo estos materiales alternativos presentan menores resistencias a la compresión en edades tempranas (Criado Sanz, 2007), para ello se ha estado desarrollando alternativas de curado como el curado térmico y el curado por carbonatación de CO_2 .

En trabajos realizados anteriormente se ha investigado qué mejoría obtienen estos materiales geopoliméricos con respecto al concreto portland convencional, reemplazando el agregado pétreo hasta el 60% de espuma rígida de poliuretano, lo que causó un aumento en las propiedades mecánicas. este trabajo busca continuar con esa investigación ampliando el espectro de investigación implementando curado por carbonatación de CO_2 y disminuyendo la cantidad de dosificaciones trabajando sobre una única muestra patrón.

El desarrollo de este trabajo de grado se divide en 4 secciones principales, inicialmente los preliminares en este se puede encontrar el planteamiento del problema, los objetivos, los antecedentes y el marco teórico en el cual se fundamenta este trabajo de grado. Luego se puede encontrar la metodología experimental donde se definen la dosificación utilizada, las características requeridas para los tres tipos de curado y los ensayos normalizados que se realizaron, seguidamente están los resultados donde se plasman las resistencias a la compresión obtenidas por las probetas y finalmente se encuentran las conclusiones de este documento. Adicionalmente se encuentran las referencias de los artículos y trabajos que fueron soporte vital del trabajo, y los anexos en donde se encuentran datos que soportan los resultados obtenidos.

2. PRELIMINARES

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En ingeniería civil a nivel mundial existen dos grandes tendencias en la construcción y lo que buscan es generar concretos con mayores prestaciones y más duraderos a la agresión de la intemperie o medios químicos. La primera tendencia se enfoca en reemplazar el cemento portland por cementantes alternativos sustentables como cenizas volantes, combustión del carbón, escorias, caolines, los cuales al activarse en medio alcalino producen hormigones geopoliméricos que exhiben mejoras en la durabilidad y la resistencia mecánica, por ejemplo, el doctor Joseph Davidovits en el año 1994 encontró que los concretos geopoliméricos obtienen resistencias entre 70 y 100 MPa (Davidovits, 1994). La segunda tendencia se refiere a un nuevo método de curado por carbonatación con CO_2 que acorde a reportes de literatura es más sustentable y contribuye al aumento de la resistencia temprana y durabilidad de los hormigones o concretos, como los hermanos Davidovits que en el año 2007 generaron una patente de un material con resistencias a la compresión entre 50 y 100 MPa (US12374912, 2007). Este nuevo método de curado captura el CO_2 fijándolo en el concreto para formar geles insolubles en agua que le otorgan al concreto mayor resistencia y mayor durabilidad que el curado convencional.

La historia narra que los primeros hormigones ecológicos fueron desarrollados por el imperio romano, estos hormigones estaban hechos basados en áridos naturales, cal y limos volcánicos de la bahía de Pozzuoli y eran hidratados usando agua de mar. Este hormigón romano presentaba alta resistencia y durabilidad debido a que se generan estructuras cristalinas resultantes de la reacción entre los componentes de los limos volcánicos y la sal presente en el agua de mar (Delatte & Norbert Delatte, 2001). Giukhovsky, en 1957, formuló una hipótesis en la que se establecía una estrecha relación entre los álcalis y los materiales cementantes, esta hipótesis no ha sido negada y representa la base para el desarrollo de nuevos materiales cementantes (Palomo et al., 2014). Además, para 1980 el doctor en química Joseph Davidovits desarrolló un material llamado KANDOXI (KAolinite, Nacrite, Dickite OXide) mezclando materiales que aportan metales alcalinos y caolín calcinado durante 6 horas a 750 °C.

Hoy en día se sabe que las propiedades de los geopolímeros pueden ser una alternativa sostenible frente a los hormigones convencionales, como mencionan Al Bakri, Kamarudin, Binhussain & Nizar (2013) el concreto fabricado utilizando ceniza volante presenta mejores propiedades que el concreto fabricado utilizando cemento portland tradicional; tras los primeros 28 días de curado (Bakri et al., 2013). Sin embargo, la resistencia a edades tempranas de los hormigones geopoliméricos, es menor que la desarrollada por hormigones de cemento portland. Para solucionar este inconveniente se ha explorado modificar la reacción de curado en edades tempranas por adición de acelerantes, plastificantes o utilizando el curado térmico con vapor de agua entre 60 y 150°C (Criado Sanz, 2007). El curado térmico demanda una infraestructura grande y alto consumo energético, no permisibles para pequeñas plantas productoras. Por ello, en años recientes, ha surgido como alternativa más sustentable y eficiente el curado de elementos de concreto mediante una tecnología de captura y fijación de CO_2 , que al reaccionar con los cementantes produce geles complejos de silicatos y carbonatos que contribuyen al aumento de la resistencia y la disminución de la permeabilidad que se refleja en mayor durabilidad de los elementos de concreto.

En la industria de la fundición es una práctica común fabricar matachos de arena silíceo aglomerados con silicato de sodio que adquieren dureza y resistencia termo mecánica al gasearlos con CO_2 .

(Departamento de ingeniería metalúrgica, s.f.). Basándose en este conocimiento, la empresa japonesa *TIS & Partners* desarrolló un material para construcción a partir de arena enriquecida en sílice y endurecida con CO₂; pero el material resultante es frágil y se desmorona; requiriendo una posterior impregnación con resinas termofijas que encarecen el proceso. Conforme lo expresa la empresa iCO2 Lab.Co.Ltd (s.f.) este material supera en 2.5 veces la resistencia a tensión de un hormigón convencional. En la actualidad los prefabricados basados en esa tecnología son comercializados con el nombre de *CO2 Eco-Structure* (iCO2 Lab Co.Ltd., s.f.) y según Foulsham (2016), un grupo interdisciplinario de la Universidad de California, en Los Ángeles, realizó una investigación con la cual crean un material llamado *CO2NCRETE* y de igual manera una investigación realizada como tesina en la Universidad Autónoma de Nuevo León demuestra que existen mezclas de concreto a las cuales se les adicionan cal y puzolanas que al curarse con vapor de agua en presencia de CO₂, desarrollan resistencias más altas y con menos consumo de cemento (Foulsham, 2016). No obstante, acorde con la información encontrada y analizada, el curado por carbonatación con CO₂ se ha practicado sobre elementos aglomerados con cemento portland, pero no se encontraron reportes de este método de curado en hormigones geopoliméricos.

En el trabajo de grado realizado por el Ingeniero Civil, de la Universidad EIA, Richard González Zuluaga y dirigido por el profesor José William Restrepo Montoya titulado *Mortero geopolimérico aligerado con espuma rígida de poliuretano* se encontró que, en contraste con el curado en condiciones ambientales, el curado térmico induce una notable mejora sobre la resistencia del hormigón geopolimérico incluso con reemplazo del agregado pétreo hasta el 60% de espuma rígida de poliuretano. Este trabajo concluye que el aumento de propiedades mecánicas se debió al efecto sinérgico entre la recuperación elástica del agregado de poliuretano y de la posible vitrificación de la matriz geopolimérica durante el curado térmico. Además, recomienda contrastar los resultados del curado térmico contra otros métodos de curado que sean más sustentables energéticamente y recipientes ambientalmente.

Considerando la contextualización previa, este trabajo de grado propone contrastar el efecto de los métodos de curado térmico y curado por carbonatación inducida con CO₂, sobre la resistencia a compresión, absorción de agua, densidad y contracción de una formulación de hormigón geopolimérico construido por agregado natural y ceniza volante activada alcalinamente con una solución de silicato de sodio e hidróxido de sodio. En consecuencia, la pregunta de investigación que se busca responder puede plantearse como ¿Es posible mediante el curado con CO₂ inducir el aumento en la resistencia a la compresión y en la durabilidad de un hormigón geopolimérico en contraste con aquellas desarrolladas en el curado térmico?

2.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

2.2.1 Objetivo General

Determinar el efecto del curado con CO₂ sobre las propiedades físicas y mecánicas de un hormigón geopolimérico en contraste con aquellas desarrolladas por curado térmico.

2.2.2 Objetivos Específicos

- Definir los parámetros de diseño de mezcla para obtener un hormigón geopolimérico; acorde con recomendaciones de la literatura disponible.
- Elaborar protocolos para efectuar los métodos de curado térmico y curado con CO₂ sobre probetas de caracterización física y mecánica del hormigón geopolimerizado.
- Caracterizar mediante ensayos normalizados, las propiedades físicas y mecánicas; particularmente, resistencia a compresión, densidad, absorción de agua y contracción de las probetas de hormigón geopolimérico curadas por ambos métodos.
- Evaluar los resultados del curado por carbonatación con CO₂ en contraste con los resultados del curado térmico.

2.3 MARCO DE REFERENCIA

2.3.1 Antecedentes

En 2015, Provis, Palomo & Shi encontraron que los geopolímeros son una alternativa como material de construcción y para otras aplicaciones. También descubrieron que mezclar cemento portland con una parte de geopolímeros puede ofrecer elementos más robustos y menos costosos (Provis, Palomo, & Shi, 2015).

En el estudio realizado por Mo, Zhang & Deng (2016) encontraron que al realizar ensayos en dos muestras con diferentes dosificaciones, una sólo de escoria de acero y otra de escoria de acero más cemento portland, ambas curadas con carbonatación de CO₂, podían obtener elementos con resistencia elevada a los 14 días, aproximadamente 72 MPa (Mo, Zhang, & Deng, 2016).

En el estudio realizado por Zhan, Poon & Shi en el 2016 se encontró que al utilizar agregados reciclados de concreto, se obtiene mejores resultados dado que estos agregados reciclados pueden reaccionar también con el CO₂ que se está inyectando a la mezcla (Zhan, Poon, & Shi, 2016).

En 2016, Zhan, Xuan, Poon & Shi descubrieron que para obtener buenos resultados al realizar el curado con carbonatación de CO₂ no es necesario hacer un curado posterior en agua para que siga consiguiendo resistencia, dado que este proceso hace que las muestras pierdan cierta resistencia que ya habían adquirido o que no aumente significativamente esto debido a que las muestras ya fueron curadas previamente y ya no tienen suficiente material que reaccione con el agua para seguir ganando resistencia (Zhan, Xuan, Poon, & Shi, 2016).

En la investigación realizada por Kaliyavaradhan & Ling (2017) encontraron que el proceso de carbonatación puede ser de dos vías: una pasiva, en la cual el material absorbe una pequeña cantidad de CO₂ simplemente por estar expuesto a este compuesto; y la activa, en la cual se controla la absorción por medio de una alta concentración de CO₂, esto mejora las propiedades del concreto dado que hace que el elemento alcance su resistencia máxima con mayor rapidez. También encontraron que el curado por CO₂ mejora propiedades como la absorción de agua, la contracción, la densidad aparente y la resistencia mecánica de los agregados (Kaliyavaradhan & Ling, 2017).

En el trabajo de investigación realizado en el 2009 por Erich David Rodríguez Martínez realizaron ensayos en diferentes tipos de mezclas geopoliméricas con cantidades y composiciones diferentes para las soluciones activadoras, estas mezclas fueron curadas térmicamente durante 48 horas a 65°C. Descubrieron que la óptima proporción de silicatos solubles en la solución activante conlleva al incremento de la resistencia a la compresión del material hasta en un 64% (Rodríguez M., Paya B., & Monzó B., 2009).

En el trabajo realizado por Estefania Robayo (2013) se evidencia que las muestras geopoliméricas curadas térmicamente obtienen resistencias mayores que las muestras realizadas bajo las mismas condiciones, pero curadas ambientalmente; además se identifica que las muestras geopoliméricas muestran menor manejabilidad mientras mayor contenido de silicato de sodio posea la muestra (Robayo, 2013).

En la tesis de Marcy Valenzuela realizada durante el 2013 se encontró que el curado térmico temprano favorece el proceso de geopolimerización; además descubrió que mientras mayores sean

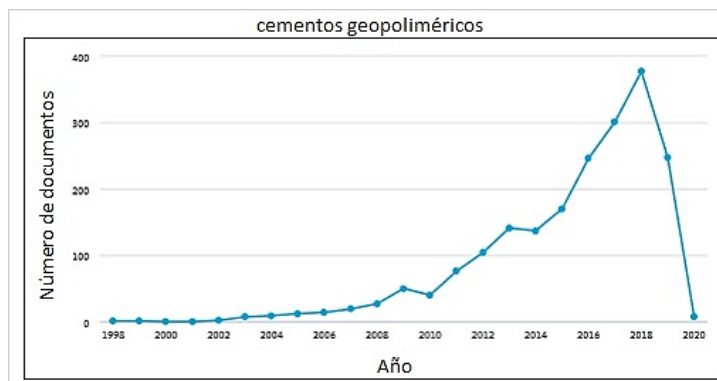
la temperatura y el tiempo de ellas dentro del horno de curado térmico, mayores resistencia podrían alcanzar. Estas resistencias a compresión se pueden encontrar alrededor de 20 MPa a los 28 días (Valenzuela H., 2013).

En la investigación realizada por Rivera, Mejia, Mejia & Gordillo (2014) se desarrollaron dos tipos de concretos híbridos uno con cenizas volantes y otro con escoria de fundición; ambos mezclados en diferentes dosificaciones con cemento portland estas obtuvieron resistencias de 63 MPa y 40.7 MPa respectivamente, mediante curado ambiental convencional. Sin embargo, las dosificaciones sin adiciones de cemento portland requirieron curado térmico para obtener resistencias de 30 MPa y 100 MPa, respectivamente (Rivera, Mejia, Mejia de Gutierrez, & Gordillo, 2014).

En la investigación realizada por Burciaga-Diaz, Escalante-Garcia & Magallanes-Rivera se encontró que existen diferentes dosificaciones que expuestas a altas temperaturas pueden desarrollar resistencias hasta 80 MPa y que la pérdida de resistencia luego de la exposición depende principalmente de la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. En la misma investigación se descubrió que la relación agua/cemento afecta inversamente proporcional la resistencia a la compresión de los materiales (Burciaga-Díaz et al., 2015).

En la investigación realizada por Vijai, Kumutha & Vishnuram se encontró que al variar el tiempo de exposición de las probetas al curado térmico la resistencia mecánica mejora significativamente, en comparación con el curado ambiental, por ejemplo al estar expuestas a 7 días y 28 días la resistencia mejora casi 100 MPa en comparación (Vijai, Kumutha, & Vishnuram, s.f.)

Como se puede ver en la Figura 1, Figura 2 y Figura 3 se realizó un análisis estadístico con la ayuda de SCOPUS para conocer la cantidad de investigaciones realizadas teniendo en cuenta varios aspectos como lo son los años, por países y por instituciones, además se tuvo en cuenta la diferencia entre las posibles palabras claves utilizadas en dichas investigaciones.



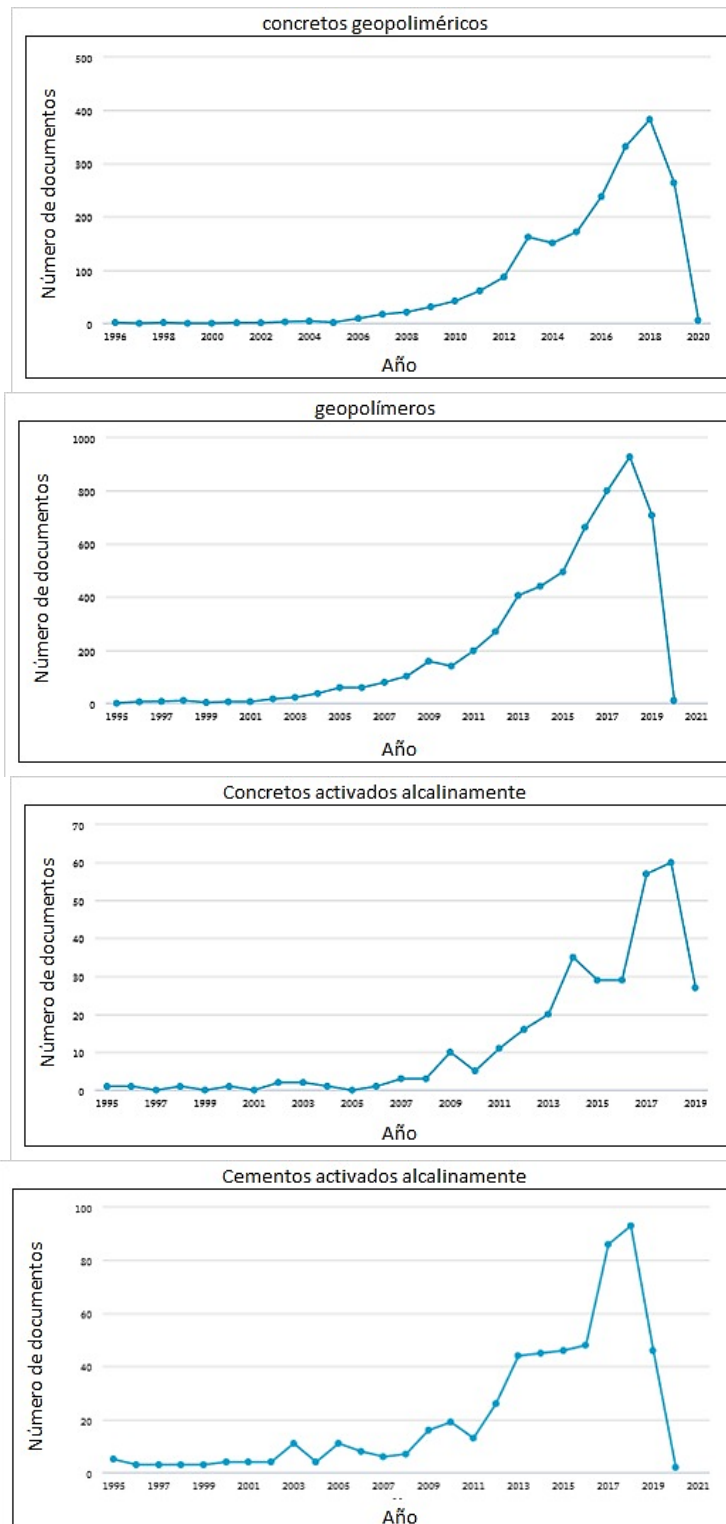


Figura 1. investigaciones realizadas por Año.

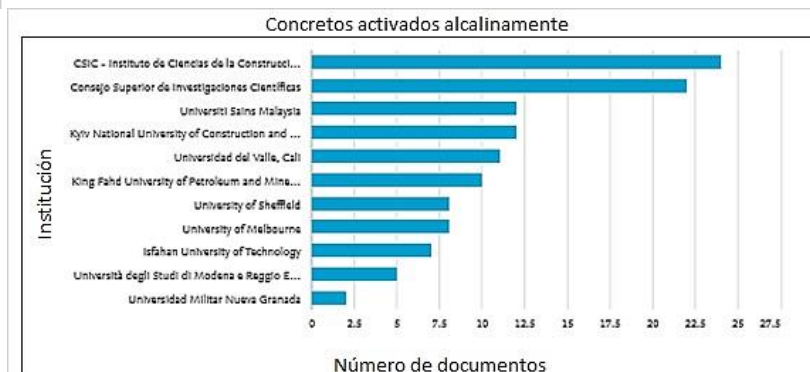
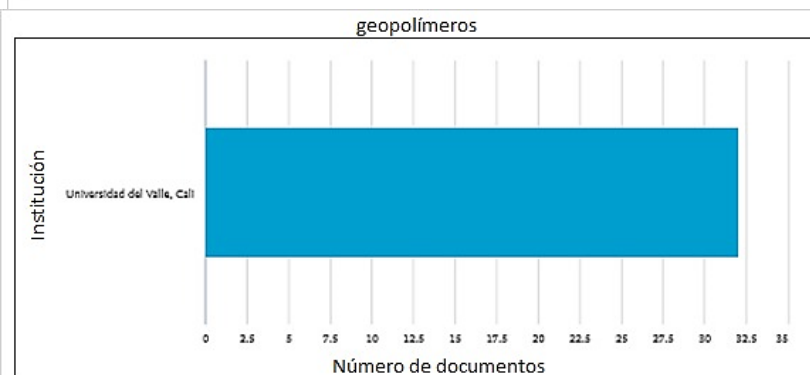
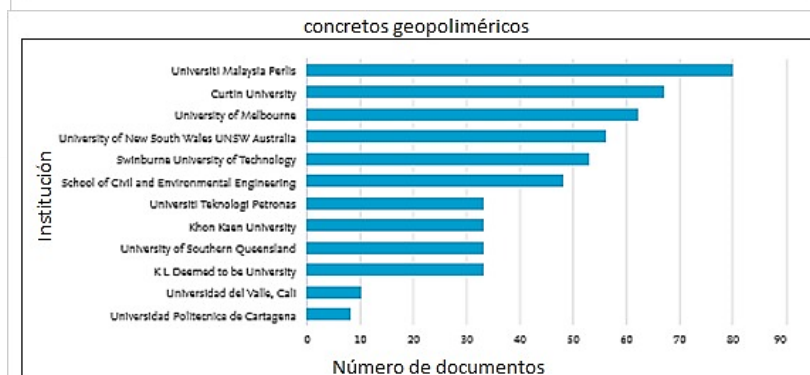
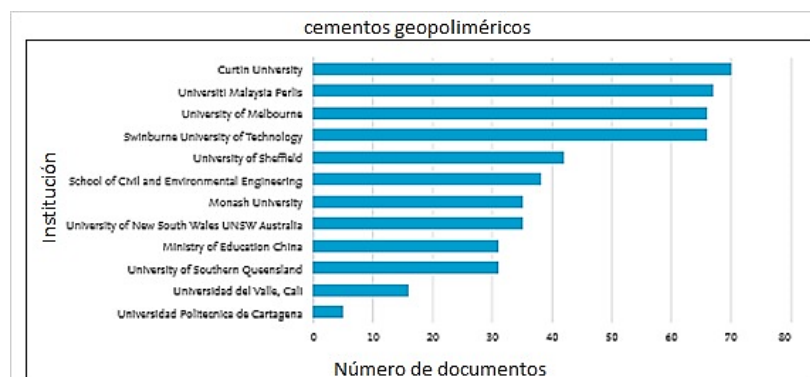
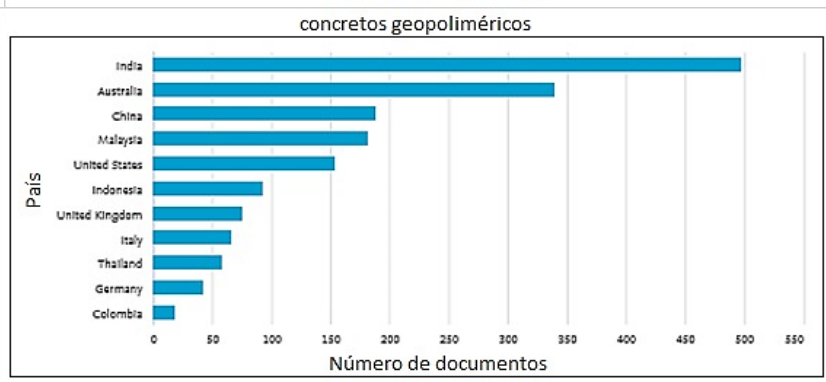
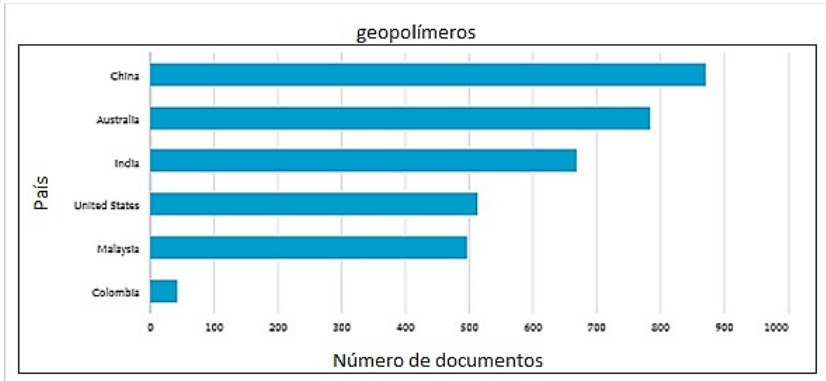
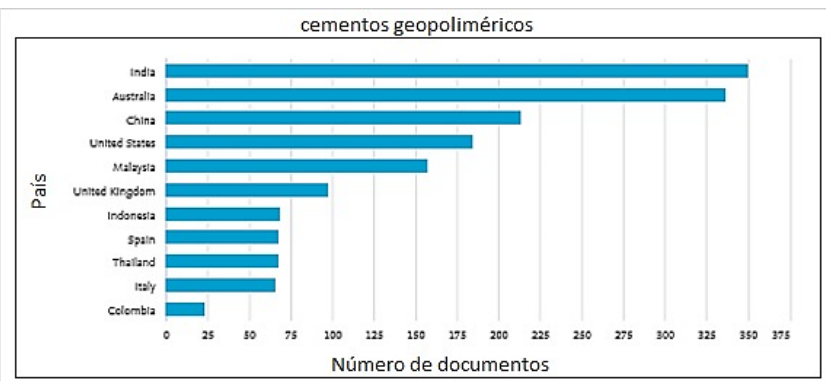




Figura 2. Investigaciones realizadas por Instituciones



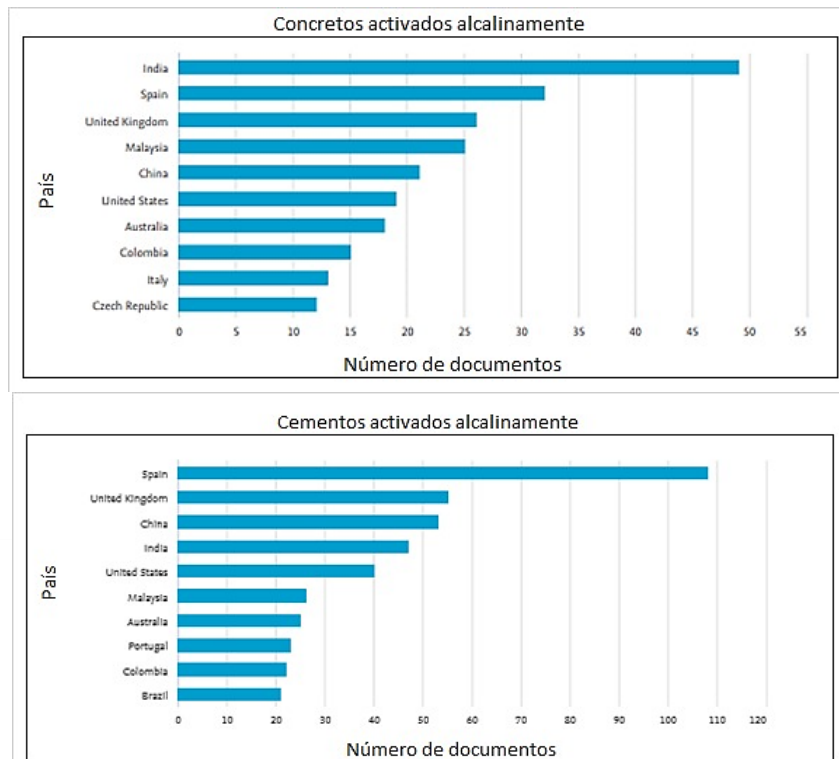


Figura 3. Investigaciones realizadas por País.

En este análisis estadístico se encontró que aproximadamente a partir del año 2000 se iniciaron las investigaciones sobre este tema, además que Colombia tiene una pequeña participación en esas investigaciones las cuales han sido realizadas por la universidad del valle en Cali.

Como se muestra en los antecedentes presentados se tiene la hipótesis de que el curado por carbonatación de CO_2 aumenta la resistencia de las muestras de concreto significativamente, pero este procedimiento de curado nunca se ha realizado en muestras geopoliméricas.

2.3.2 Marco teórico

- **Concreto**

La empresa Argos define, "el concreto es una mezcla de cemento, grava, arena, aditivos y agua. Maleable en su forma líquida y de gran resistencia en su estado sólido" (Argos, 2017). Los componentes del concreto se explican de forma más detallada a continuación.

- i. **Cemento**

El cemento hidráulico puede definirse como un polvo fino obtenido de la calcinación de una mezcla de caliza con mineral de hierro. Este producto es, más específicamente, el Clinker el cual se mezcla con otros aditivos para generar el cemento en sí (CEMEX, 2017). Complementariamente, Según Argos (2017) informa que, "El cemento es un material que reacciona con el agua y que actúa como aglutinante presentando propiedades de adherencia y cohesión. Es diseñado para uso de mezclas de concreto o mortero, pega, pañete y acabados, para ser utilizados en diversas estructuras y construcciones."

- ii. **Agregados**

Civil Geeks (2013) menciona sobre los agregados que son materiales de forma granular de origen natural o artificial, los más frecuentes son los de origen pétreo, aunque algunos materiales sintéticos como las escorias granuladas, limaduras metálicas, poliuretanos se han usado eficientemente. Constituyen entre el 65 y el 85% del volumen total del hormigón y que, aglomerados por el cementante, conforman el esqueleto pétreo o granular del hormigón. Su estudio está más justificado porque de sus propiedades dependen las que tienen que ver con la resistencia, rigidez y durabilidad del hormigón (Giraldo B., 2013).

Como agregados para hormigón se pueden considerar todos aquellos materiales que, teniendo una alta resistencia mecánica, no alteran ni afectan las propiedades y características del hormigón y garantizan una adherencia suficiente con la pasta endurecida de cementante.

- **Geopolímero**

Los materiales geopoliméricos son compuestos por aluminosilicatos activados con álcalis, que demuestran muy buena resistencia física y química (Duxson, Provis, Lukey, & van Deventer, 2007). "Los geopolímeros pueden ser sintetizados a partir de diferentes fuentes de materiales como arcillas calcinadas, minerales naturales, desechos industriales, rocas volcánicas o mezclas de dos o más materiales" (Muñiz V., Manzano R., Gasca, & Rubio A., 2011).

Además, según la definición de McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, & Corder (2011) el concreto geopolimérico es una alternativa potencial al concreto estándar y una oportunidad para convertir una variedad de flujos de residuos en subproductos útiles (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, & Corder, 2011)

A la hora de utilizar este término para aplicarse a los concretos, es necesario destacar que se puede tener cemento geopolimérico sin realizar la mezcla para obtener concreto. Como mencionan Abdel-Gawwad & Abo-El-Enein (2016), el cemento geopolimérico es el resultado de la reacción entre un componente con aluminosilicatos y una solución concentrada alcalina (Abdel-

Gawwad & Abo-El-Enein, 2016). Este cemento es luego utilizado como principal componente del concreto conocido como concreto geopolimérico.

- **Curado convencional**

El curado convencional de los elementos de concreto se realiza manteniendo el elemento de concreto húmedo para así facilitar la reacción que se da entre el cemento y el agua (Montalvo Peña, s.f.).

Según el Instituto Americano del Concreto (2016), el curado es "el proceso por el cual el concreto elaborado con cemento hidráulico madura y endurece con el tiempo, como resultado de la hidratación continua del cemento en presencia de suficiente cantidad de agua y calor" (ACI Committee, 2016).

- **Curado por CO₂**

Según Shi, Wang, He, & Liu (2012) el curado con CO₂ es una tecnología alternativa amigable con el ambiente para la producción de concreto. (Shi, Wang, He, & Liu, 2012)

- **Curado térmico**

Según el informe sobre tratamientos térmicos al hormigón realizado por J. Calleja en el año 1967, el curado térmico es una forma de acelerar el fraguado de los elementos de hormigón y existen varias formas de realizar este curado térmico como lo son: calentamiento previo de los materiales, inmersión en agua caliente, curado en vapor a presión, y calentamiento eléctrico (Calleja, 1967). La forma más utilizada es la última llamada calentamiento eléctrico

3. METODOLOGÍA

La metodología utilizada se resume a continuación, inicialmente se realizó investigación para encontrar la dosificación que se utilizó, seguido de la obtención de las materias primas y la caracterización de las materias primas que no tenían una caracterización previa. Luego se desarrollaron los ensayos correspondientes para caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del material teniendo en cuenta los diferentes métodos de curado y finalmente se realizó una comparación de los resultados obtenidos.

3.1 OBTENCIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

3.1.1 Ceniza volante

La ceniza volante utilizada en este trabajo de grado fue suministrada como donación académica por la empresa AHINCO S.A. Esta ceniza es comercializada con la marca CENIX y es producto de la combustión del carbón para los procesos textiles de la empresa Coltejer, este producto es comprado por AHINCO S.A. y esta a su vez lo distribuye como puzolana cementante para complementar y reemplazar parcialmente el cemento portland en diferentes industrias de construcción en el Valle de Aburrá. En el **Error! Reference source not found.** se muestra un ensayo de microscopia electrónica de barrido (SEM por sus siglas en ingles) que se le realizó al material y la ficha técnica de este material se muestra en **Error! Reference source not found.** En la Figura 6, se puede ver cómo es la ceniza volante con la cual se trabajó.

3.1.2 Arena

El agregado pétreo utilizado para el desarrollo de este trabajo de grado fue suministrado por los laboratorios de la Universidad EIA. Este agregado pétreo es arena de cantera que no ha sufrido ningún tipo de alteración desde su extracción hasta su llegada a los laboratorios de la EIA. En la Figura 6 se puede ver la arena a utilizar en este proyecto.

Debido a que esta materia prima es la única que no tiene un destino específico donde se ofrezca una caracterización de esta se realizó una de las caracterizaciones más básicas para los áridos que es la granulometría como se muestra a continuación.

- **Granulometría**

Para que los cubos de mortero tengan buena repetibilidad se debe tamizar la arena para que el tamaño máximo de partícula que se tenga en la muestra de mortero sea un décimo de la medida más grande del molde. En la Figura 4 se muestra que la arena la cual fue pesada antes de pasarla por el tamiz número 4 que tiene una apertura de 4.75 mm lo que permite tener una diferencia de dimensiones de 1/10.



Figura 4. Proceso de clasificación granulométrica de la arena

Para realizar el tamizaje de la muestra de arena, se utilizaron los tamices número 4,8, 16,30,40,100 y 200. Como se muestra en la Figura 4, el tamizaje resulta en la granulometría mostrada en la Figura 5.

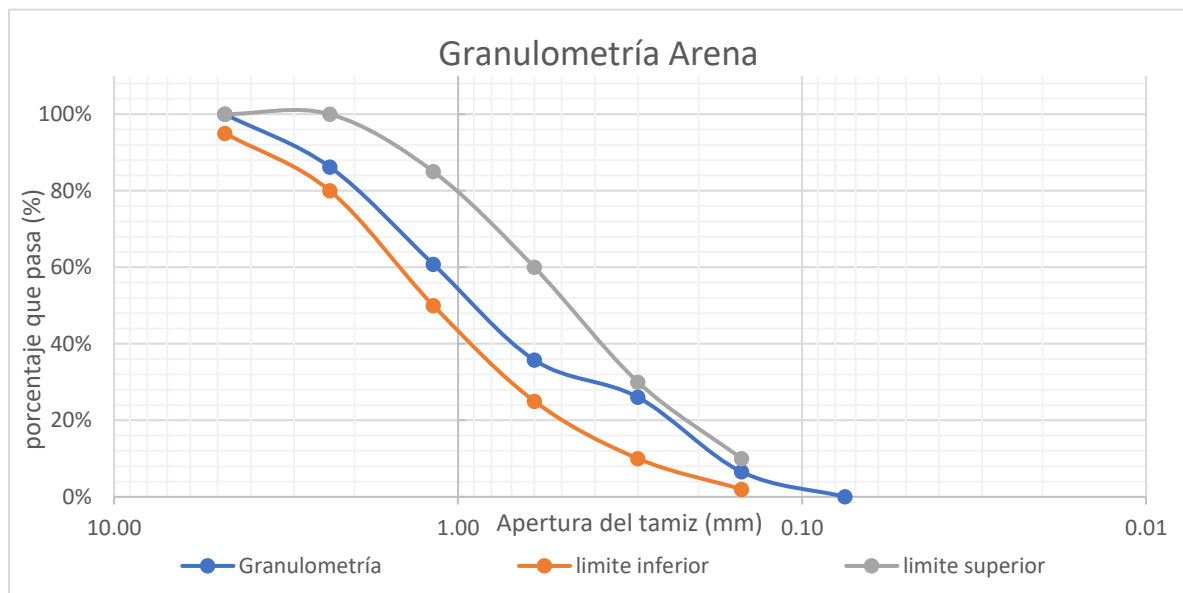


Figura 5. Granulometría de la arena utilizada

3.1.3 Silicato de sodio

Según la página web de Manufacturas Silíceas S.A.S. este material es utilizado en diferentes sectores de la economía colombiana como lo son la industria de los cerámicos donde es utilizado como defloculantes para el proceso de fabricación de productos de gres y otros minerales, la industria de fundición donde es utilizado como aglutinante y la industria de los cementos y concretos donde es utilizado como parte de la mezcla debido a que se genera una masa homogénea de propiedades adhesivas bastante fuertes (SAINET, 2106). El silicato de sodio es un silicato de pega, usado como aglomerante, endurecedor, acelerante de curado e impermeabilizador de concretos. Su principal función en la dosificación es ser fuente adicional de

sílice necesaria para la geopolimerización de la ceniza volante al mismo tiempo que sirve como agente aglomerante. Para el desarrollo de este trabajo de grado se utilizó Silicato de sodio (Na_2SiO_3) para pega suministrado por la empresa Spin S.A. La ficha técnica y la hoja de seguridad de esta materia prima se incluyen como **Error! Reference source not found.** y **Error! Reference source not found.** respectivamente.

3.1.4 Hidróxido de sodio

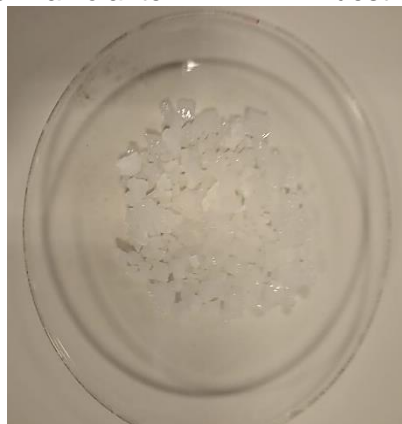
Este material fue suministrado por la empresa ProtoKimica S.A.S, también es conocido como Sado Caustica y es utilizado como activador alcalino para el proceso de geopolimerización entre el silicato de sodio y los minerales contenidos en la ceniza volante. La ficha técnica de este material donde se especifican todas sus características se muestra en el **Error! Reference source not found.** En la Figura 6 se puede evidenciar el hidróxido de sodio (NaOH) en escamas, con el cual se realizará la soda cáustica.



Muestra de ceniza volante



Muestra de Arena



Muestra de hidróxido de sodio en escamas

Figura 6. Materias primas.



3.2 PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DE LA MEZCLA

Los parámetros de diseño de mezcla fueron determinados atendiendo recomendaciones de la literatura existente, seleccionando aquellas dosificaciones, reportadas en artículos científicos y trabajos académicos o tesis que, fuesen representativas en cuanto a resistencia, relación agua cemento, entre otros factores. La investigación de Estefanía Robayo Núñez para acceder a su título de ingeniera civil arrojó una dosificación interesante con ciertos parámetros importantes como la resistencia a la compresión a los 28 días que fue de 25 MPa; además especifica que las probetas fueron curadas a 60 °C durante 48 horas y luego siguieron un curado ambiental (al aire libre) para finalmente ser fallados a la edad predeterminada (Robayo, 2013). También hay otras investigaciones que fueron de ayuda para elegir la dosificación de la mezcla, como el trabajo de Andreas Nataatmadja en donde se identifica que con una mezcla geopolimérica definitiva se puede obtener una resistencia a la compresión de 35 MPa siempre y cuando se cure térmicamente bajo 105 °C durante 24 horas (Nataatmadja, 2015).

En la búsqueda realizada se encontró que el ingeniero Richard González ya había abordado muchos de estos trabajos y el en su trabajo de grado titulado “MORTERO GEOPOLIMERICO ALIGERADO CON ESPUMA RIGIDA DE POLIURETANO”, utilizo una dosificación específica para obtener un geopolímero la cual sometió a dos tipos de curado, el ambiental y el térmico. Encontró que el curado térmico generaba un endurecimiento porque transforma las cenizas volantes en una matriz cerámica con geles de silicio altamente deshidratados, los cuales proporcionan resistencia al material y sellan poros brindándole una protección a ataques de sulfuros o ácidos (González Zuluaga, 2018). Debido a los resultados prometedores con el curado térmico del trabajo de Richard González, se decidió replicar la dosificación geopolimérica usada por él (Tabla 1. Dosificación), con el fin de identificar si el curado por carbonatación de CO₂ muestra alguna mejora en la resistencia a la compresión en contraste a la desarrollada en el curado térmico.

Tabla 1. Dosificación

Ceniza volante (ASTM C618)	Arena (Cantidad / Tamaño)	Solución NaOH (Molaridad)	Solución Na ₂ SiO ₃ (Composición)	Relación Agregado / Ceniza	H ₂ O Adicional	Relación Alcalina / Ceniza	Relación Na ₂ SiO ₃ / NaOH	Relación SiO ₂ /Na ₂ O
Ceniza Marca CENIX (Ahinco SA: Coltejer) 1 Parte	Arena (4.75 mm máx.) 3 Partes	Solución (14M) 0.17 Partes	(Acuambiente Ltda.) Grado 42 0.43 Partes	3	La necesaria para producir asentamiento entre 5-10 cm	0.6	2.5	3

Para encontrar las cantidades de los materiales mencionados en la Tabla 1, se realizó el siguiente protocolo basado en el procedimiento utilizado por Pedro Díaz en su tesis de pregrado (Díaz & Delfín A., 2012).

1. Se supone la densidad del mortero de 2100 kg/m³, esta puede tener un valor entre 2000 y 2800 Kg/m³.
2. Se utiliza un porcentaje de agregado de 65 lo que corresponde en peso a:

$$Agregado = 0.65 * 2100 = 1365 \text{ kg/m}^3$$

3. la densidad del mortero es dada por la suma de las densidades de las materias primas que lo conforman, es decir, que los 2100 kg/m³ corresponde a la suma de las densidades de la fuente de aluminosilicatos también se le puede decir ceniza volante y de la solución activante compuesta por el hidróxido de sodio y el silicato de sodio, entonces:

$$\text{Ceniza} + \text{Solución activante} + \text{Agregado} = 2100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Ceniza} + \text{Solución activante} + 1365 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Ceniza} + \text{Solución activante} = 2100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 1365 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Ceniza} + \text{Solución activante} = 2100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 1365 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Ceniza} + \text{Solución activante} = 735 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Luego, conociendo la relación solución activante y ceniza tenemos,

$$\frac{\text{Solución activante}}{\text{ceniza volante}} = 0.6$$

Por ende,

$$\text{Solución activante} = 0.6 * \text{Ceniza}$$

$$\text{Ceniza} + 0.6 * \text{Ceniza} = 735 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Ceniza} = \frac{735 \text{ kg}}{1.6 \text{ m}^3}$$

$$\text{Ceniza volante} = 459.375 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Solución activante} = 275.625 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Dado que la solución activante está compuesta de hidróxido de sodio y silicato de sodio y conocemos su relación por lo tanto se conoce su densidad, así:

$$\frac{\text{Silicato de sodio}}{\text{hidróxido de sodio}} = 2.5$$

$$\text{Silicato de sodio} + \text{hidróxido de sodio} = \text{Solución activante}$$

$$\text{Hidróxido de sodio} + 2.5 * \text{hidróxido de sodio} = 275.625 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{hidróxido de sodio} = \frac{275.625 \text{ kg}}{3.5 \text{ m}^3}$$

$$\text{Hidróxido de sodio} = 78.75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Por lo tanto,

$$\text{Silicato de sodio} = 196.875 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En la Tabla 2 se muestra el peso de cada material utilizado en la dosificación.

Tabla 2. Cantidades de los materiales en la dosificación

Material	Peso en Kg por cada m³ de mezcla
Ceniza volante	459.375
Arena	1365
Hidróxido de Sodio	78.75
Silicato de Sodio	196.875

3.3 PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN ALCALINA

Teniendo en cuenta los reportes de la literatura especializada se utilizó una solución de hidróxido de sodio 14 M como activador alcalino cuya preparación se describe a continuación y se resume en la Figura 8. A continuación, se muestra el procedimiento para realizar el hidróxido de sodio 14M. Este material se realizó mezclando 560 g de escamas de hidróxido de sodio con 1 litro de agua en un balón volumétrico mientras se aforaba. Inicialmente se toman 560 g de escamas de hidróxido de sodio (Figura 7a) y posteriormente se toman 1000 g de agua (Figura 7b). El proceso de formación del hidróxido de sodio (NaOH) líquido de concentración 14 M, comienza introduciendo las escamas de hidróxido de sodio previamente pesadas al balón volumétrico (Figura 7c), posteriormente se añade agua al mismo recipiente, teniendo en cuenta que el líquido debe ser aforado constantemente (Figura 7d). Finalmente, se obtiene hidróxido de sodio 14M líquido (Figura 7e). Luego de esto, la solución de hidróxido de sodio se debe dejar reposar entre 1 y 2 horas después de que la solución este completamente lista para que el proceso exotérmico se realice.

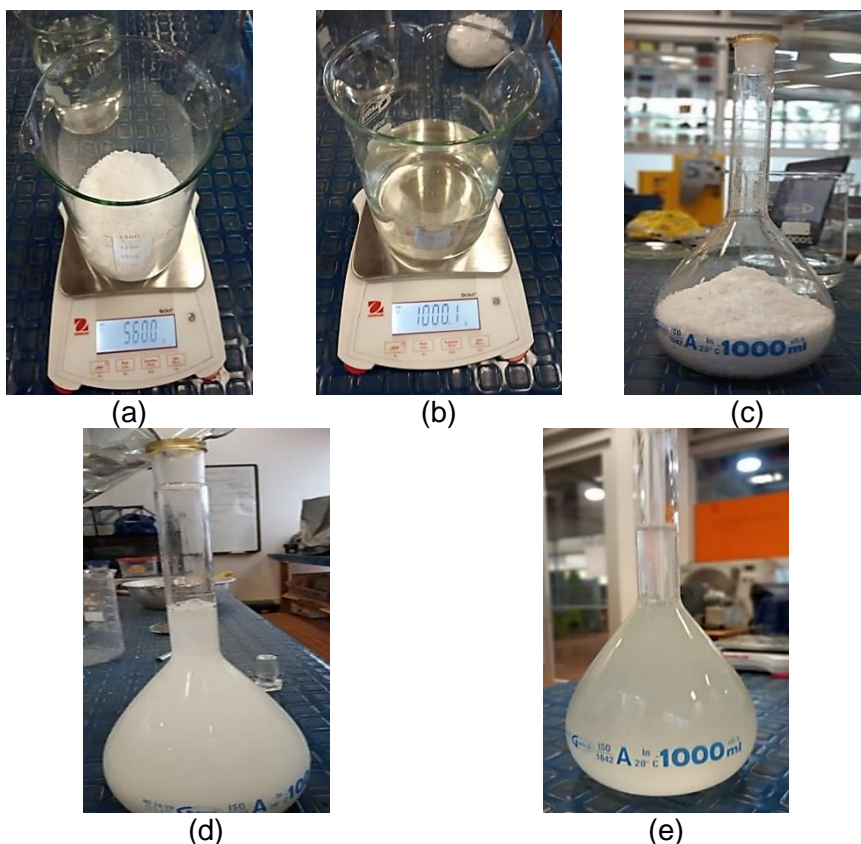


Figura 7. Procedimiento de preparación del hidróxido de sodio

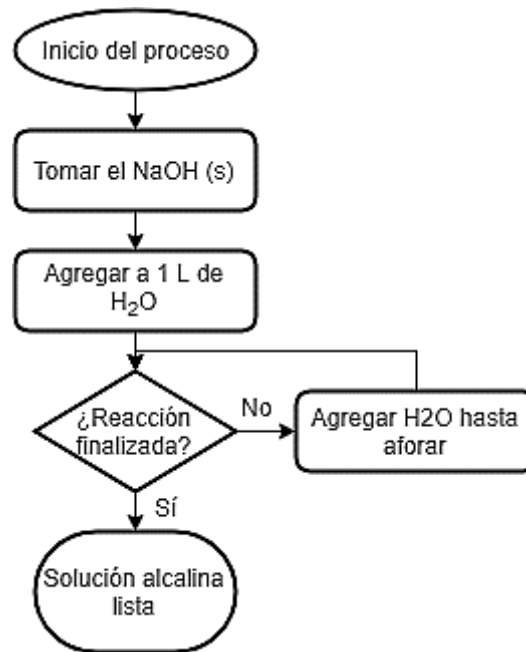


Figura 8. Diagrama de proceso solución alcalina

Antes de comenzar con la fabricación del hormigón geopolimérico se preparó la solución alcalina con una razón de 2.5 entre el silicato de sodio e hidróxido de sodio (Tabla 1). Para este proceso, primero se debió agregar 78.75 kg/m³ de hidróxido de sodio y luego 196.875 kg/m³ de silicato de sodio a un Beaker. Finalmente, la solución se homogenizó por agitación magnética durante 1 minuto como se observa en la Figura 9.

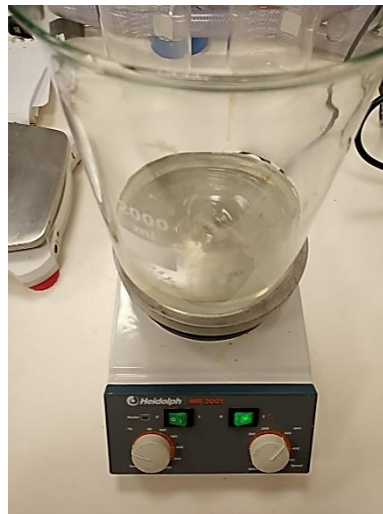


Figura 9. Solución activadora

3.4 PREPARACIÓN DEL GEOPOLÍMERO

El procedimiento de elaboración del hormigón geopolimérico se describe esquemáticamente mediante la Figura 10. Inicialmente se pesa en un Beaker la cantidad de solución alcalina requerida, como se indica en la sección 3.2, la mitad de la solución alcalina se vertió en la tolva de una mezcladora planetaria, Hobart y posteriormente se agregaron 1365 kg/m^3 de arena. A continuación, se activó la mezcladora en su velocidad más baja dejándola operar por 1 minuto. Transcurrido ese tiempo, se detuvo la mezcladora y se adicionaron 459.375 kg/m^3 de ceniza volante, encendiendo nuevamente la mezcladora en su velocidad más baja durante 1 minuto. Finalmente se adicionó la mitad restante de solución alcalina, mezclando a la menor velocidad durante 4 minutos. Se detuvo la mezcladora, para tomar una porción del hormigón con la cual se conformó una bola en la palma de la mano con el fin de estimar, cualitativamente, su consistencia y fluidez. Durante las etapas de mezclado, la solución activadora, inicio el proceso de geopolimerización reduciendo la fluidez del hormigón preparado. Por lo tanto, buscando mejorar la fluidez del hormigón geopolimérico que sería utilizado para conformar las probetas de caracterización, se adicionó de forma controlada agua, hasta completar 200g.

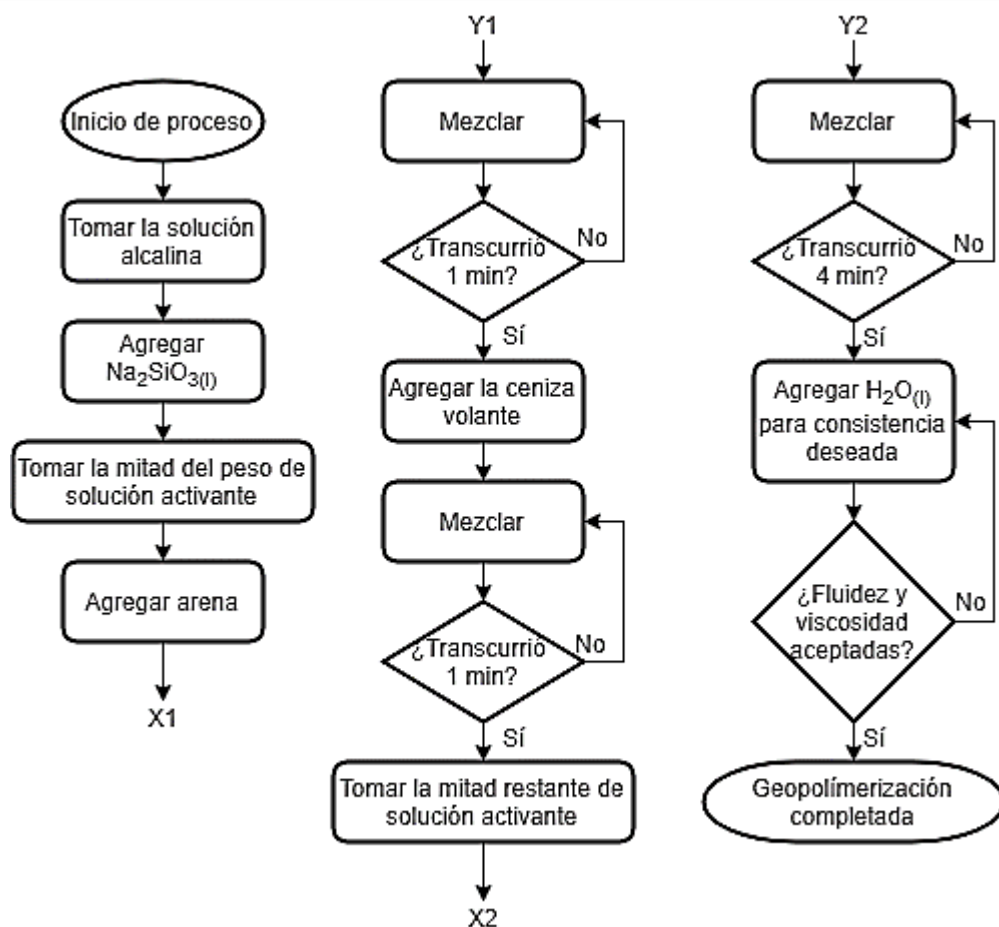
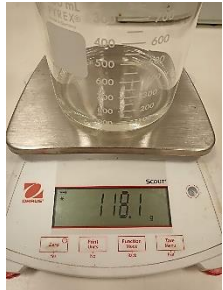


Figura 10. Diagrama de proceso de geopolimerización



(a) Hidróxido de sodio



(b) Silicato de sodio



(c) Solución alcalina



(d) Inicio de
procedimiento de
mezclado



(e) Procedimiento de
mezclado

Figura 11. Procedimiento de mezclado.

En la Figura 11 (a) y (b) se muestran el hidróxido de sodio y el silicato de sodio respectivamente, utilizados para generar la solución alcalina que se ve en la Figura 11 (c), además se puede evidenciar el procedimiento de ejecución de la mezcla dentro de la mezcladora (Figura 11 (d) y (e)).

Para conformar las probetas de ensayo se utilizaron moldes cúbicos de 50 mm de lado en los cuales se vertió el hormigón geopolimérico (Figura 12 (c)), realizando aproximadamente 30 chuzadas haciendo uso de los dedos, esto debido a que la varilla de acero podía afectar o dañar los moldes, posteriormente se usó una espátula para nivelar las superficies de las probetas y finalmente se golpearon suavemente los bordes de los moldes con un martillo de goma (Figura 12 (d)), esto para favorecer el asentamiento del hormigón y reducir posible porosidad.



(a) Mezclado final



(b) Viscosidad de la
mezcla



(c) Colocación en
moldes



(d) Resultado final

Figura 12. Colocación en moldes.

3.5 PROCEDIMIENTOS DE CURADO

En este apartado, a continuación, se describen los procedimientos bajo los cuales se efectuaron los tres tipos de curados a los cuales se sometieron las probetas de los hormigones de ceniza volante activados alcalinamente. Es adecuado informar que, si bien, en los objetivos se dejó por sentado que en este trabajo de grado se pretendía contrastar los resultados del curado con CO_2 contra el curado térmico; también se realizó el curado ambiental con el fin de contrastar en qué medida los dos primeros métodos de curado podían suponer alguna mejora de propiedades respecto al convencional curado ambiental.

3.5.1 Curado ambiental

El curado convencional de los elementos de concreto se realiza manteniendo el elemento de concreto húmedo para así facilitar la reacción que se da entre el cemento y el agua (Montalvo Peña, s.f.).

El procedimiento por seguir con este tipo de curado es que luego de realizar las probetas y desmoldarlas se llevaron a una cámara de curado ambiental donde la humedad del ambiente permita que las muestras reciban suficiente agua para realizar su curado y ganar la resistencia requerida (Figura 16a). En la Figura 13 se muestra la caja de plástico que fue usada como cámara de curado ambiental, esta caja de plástico contenía una lámina de agua y una placa de madera donde se ponían las muestras para mantener la humedad relativa lo más constante posible y que el agua no estuviera nunca en contacto con las probetas.

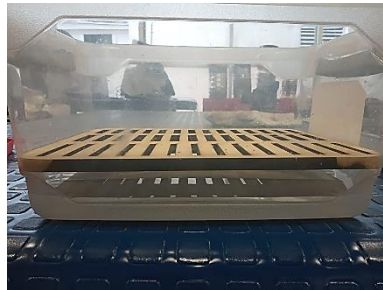


Figura 13. Cámara de curado ambiental.

3.5.2 Curado por carbonatación con CO_2

El proceso de curado con CO_2 consiste en inyectar una cantidad de CO_2 gaseoso a las probetas de hormigón geopolimérico, de modo que reaccione con el silicato de sodio, presente en los hormigones geopoliméricos, para formar un gel de sílice y carbonato de sodio. Este gel formado actúa como aglomerante entre los granos de sílice, es decir, este proceso genera una mayor cantidad de aglomerante en los intersticios de la mezcla, que el proceso común por ende se cree que genera mayor resistencia y reduce la permeabilidad al agua.

El procedimiento que se siguió con este curado después de realizar las probetas y desmoldarlas fue que inmediatamente se desmoldaron se transportaron al lugar donde se encontraba la cámara de carbonatación y se procedió a ingresarlas a esta. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por Lee, Song, Kim, Song, & Seo (2016) y Zhan, Poon, et al (2016), se estableció que la temperatura de la cámara fuera de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Lee, Song, Kim, Song, & Seo, 2016), así como la presión interna en la

cámara fuera de 0.1 bar y la saturación de CO₂ de 99.5% (Zhan, Poon, et al., 2016). Esta combinación de parámetros surge del aprovechamiento de la relación en cada artículo con las propiedades mecánicas obtenidas, sin embargo, ya que ambos diferían en el porcentaje de humedad relativa de las muestras se decidió que la humedad relativa fuera mínima (Zhan, Poon, et al., 2016). Posterior al curado se comenzó la etapa de postcurado ingresándolas a la cámara de curado ambiental hasta la edad del ensayo como se muestra en la Figura 16b.

Para este curado, se planeaba utilizar una cámara de carbonatación que sería construida para la Universidad EIA en el marco de un proyecto de investigación cofinanciado por Colciencias, cuyo director es el profesor José William Restrepo Montoya quien además es el director de este trabajo de grado.

Debido a demoras en la aprobación de pólizas y contratos por parte de Colciencias para iniciar la ejecución del proyecto, la cámara de carbonatación no se pudo construir en el primer semestre de 2019. Este imprevisto, obligo recurrir a la cámara de carbonatación del CIDEMAT (Centro de Investigación, Innovación y desarrollo de Materiales) de la Universidad de Antioquia. En la cámara de carbonatación que se pensaba utilizar, justo después de ingresar las probetas se efectuaba una purga con CO₂ para extraer el aire atmosférico y seguidamente se inyectaba el CO₂ gaseoso con determinadas condiciones de presión, humedad relativa y pureza del aire. Sin embargo, en la cámara de carbonatación del CIDEMAT no se pueden controlar estas variables debido a que esta cámara es de paso, es decir, que constantemente está fluyendo CO₂ gaseoso, a través de ella a caudal constante, por lo tanto, esta cámara únicamente controla el porcentaje de CO₂ que ingresa a ella constantemente. Es de apuntar que, esta variación de condiciones puede alterar los resultados esperados, obteniéndose variaciones considerables con los resultados reportados en la literatura de curado con CO₂ de hormigones elaborados con cemento portland.

En la Figura 14 se muestra la acomodación de las muestras del hormigón geopolimérico durante la carbonatación de CO₂ gaseoso con un porcentaje de paso de 4%, esto significa que del aire que le ingresa a la cámara solo el 4% es CO₂ gaseoso. La humedad de las muestras se trató de controlar, añadiendo copas con gel de sílice para que este atrapara la mayor cantidad de humedad dentro de la cámara de carbonatación. Las demás condiciones del ensayo fueron una humedad relativa de 99% y una temperatura aproximada de 28°C.

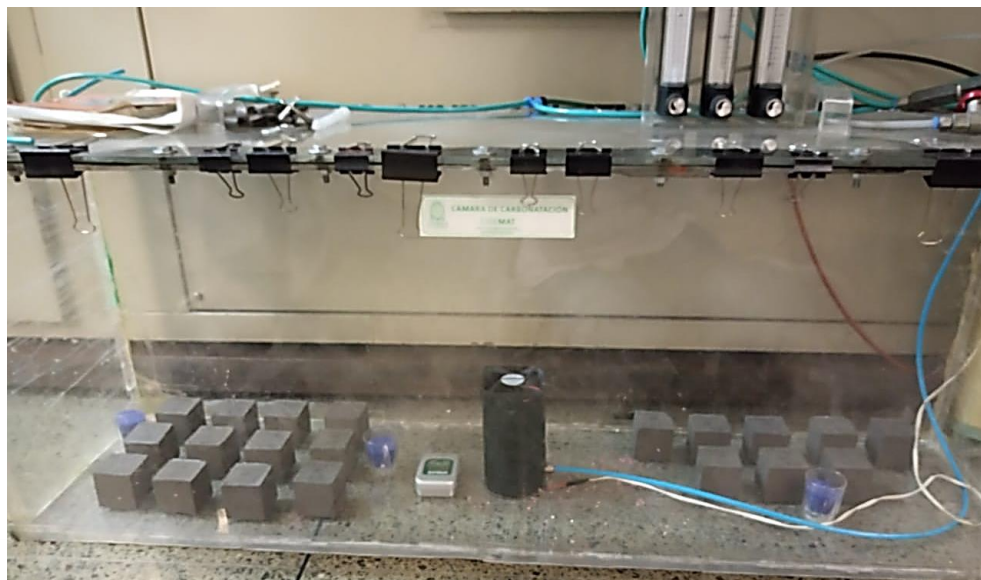


Figura 14. Cámara de carbonatación del CIDEMAT.

3.5.3 Curado térmico

Según el informe sobre tratamientos térmicos al hormigón realizado por J. Calleja en el año 1967, el curado térmico es una forma de acelerar el fraguado de los elementos de hormigón y existen varias formas de realizar este curado térmico como lo son: calentamiento previo de los materiales, inmersión en agua caliente, curado en vapor a presión, y calentamiento eléctrico (Calleja, 1967). La forma más utilizada es la última llamada calentamiento eléctrico.

Para realizar el curado térmico se utilizó el horno Memmert del laboratorio de materiales de la universidad EIA que se muestra en la Figura 15, las muestras se ingresaron durante 48 horas a 60 °C y luego se procedió a ingresar las muestras a una cámara de postcurado ambiental hasta la edad de falla como se muestran en la Figura 16c.



Figura 15. Horno de curado térmico

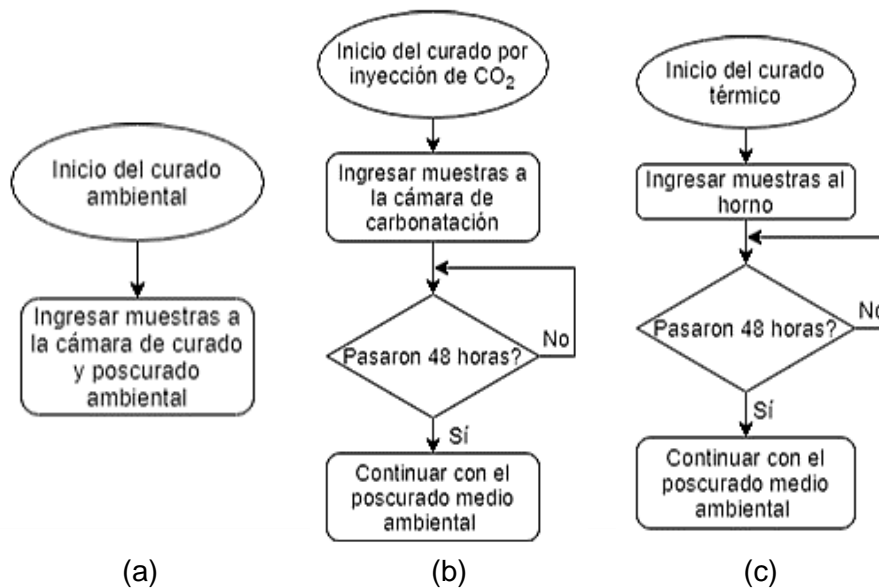


Figura 16. Diagramas de proceso de los diferentes métodos de curado.

Independientemente del tipo de curado que se les haya realizado a las probetas estas se ingresan a una cámara de curado ambiental como se muestra en la Figura 13, donde se realiza el curado posterior, para tener control sobre la evolución de las edades de curado, la absorción de humedad y conocer cuál es el efecto que estas variables tiene sobre las propiedades mecánicas y físicas evaluadas en el hormigón geopolimérico.

3.6 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGON GEOPOLIMÉRICO

Para realizar la caracterización física y mecánica del material se realizaron diferentes ensayos a las probetas. Para la caracterización mecánica se realizaron ensayos de compresión para cuatro edades de curado diferentes (3, 14, 28 y 56 días) indistintamente del tipo de curado practicado a las probetas de hormigón geopolimérico. Este ensayo se realizó utilizando una prensa hidráulica FORNEY suministrada por la universidad EIA. El ensayo de resistencia a la compresión se realizó en las probetas cubicas de 50 mm de lado siguiendo recomendaciones de la NTC 220.

Para la caracterización física se midió la variación de masa y volumen utilizando, respectivamente, una balanza digital *OHAUS* con una precisión de 0.1g y un calibrador digital *Insize* con una precisión de 0.01mm. Estos procedimientos se efectuaron cada semana para conocer la variación de estas propiedades durante todo el periodo de postcurado.

También se realizó un ensayo de absorción de humedad en las probetas este ensayo consta en verificar la cantidad de agua que son capaces de absorber las probetas de geopolímero elaboradas, para tal fin se secaron las muestras durante 24 horas dentro del horno y se pesaron para obtener el peso seco, luego se ingresaron en agua durante 24 horas para conseguir el peso de las probetas saturadas con esto se consigue el porcentaje de absorción. Este procedimiento se realizó siguiendo las recomendaciones de la NTC 4017. Este ensayo fue realizado sobre las probetas que quedaron más completas luego de ser falladas a la edad de 28 días de cada uno de los tipos de curado; sin embargo, estas probetas son útiles para determinar el porcentaje de absorción de humedad por calculo gravimétrico. Las evidentes diferencias de peso son debidas a que a las probetas se les retiraron los pedazos que estaban fáciles de retirar, esto dado que al ingresarlos al horno o al agua estos trozos podían desprenderse y cambiar la masa, la cual es la herramienta del ensayo.

Finalmente se compararon los resultados obtenidos a partir de los ensayos practicados a las probetas, considerando los tipos de curados y las afectaciones que estos generan en la dosificación. Con esta comparación, realizada mediante graficas que muestran la evolución del material, se busca identificar cuál de los tres tipos de curado generó una mejora importante en el material y si este pudiese ser utilizado en la industria colombiana.

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta, mediante figuras descriptivas, la evolución y variación de las propiedades físicas y mecánicas del hormigón geopolimérico diseñado y preparado en función del tipo y edad de curado de las probetas. Cabe aclarar que los datos graficados en las figuras corresponden a los valores promedios de los datos registrados durante el periodo de experimentación.

4.1 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En el ANEXO 6 se reportan en tablas los valores registrados de la resistencia a la compresión para cada probeta individual. Con los valores promedio se elaboró la Figura 17 **Error! Reference source not found.** que representa la variación de la resistencia a la compresión para los métodos de curado térmico y curado ambiental a los 3, 14, 28 y 56 días y para el curado por carbonatación de CO₂ se tienen resultados para 3, 16, 29 y 57 días lo anterior debido a que para utilizar la cámara de carbonatación del CIDEMAT era obligatorio elaborar las muestras un sábado.

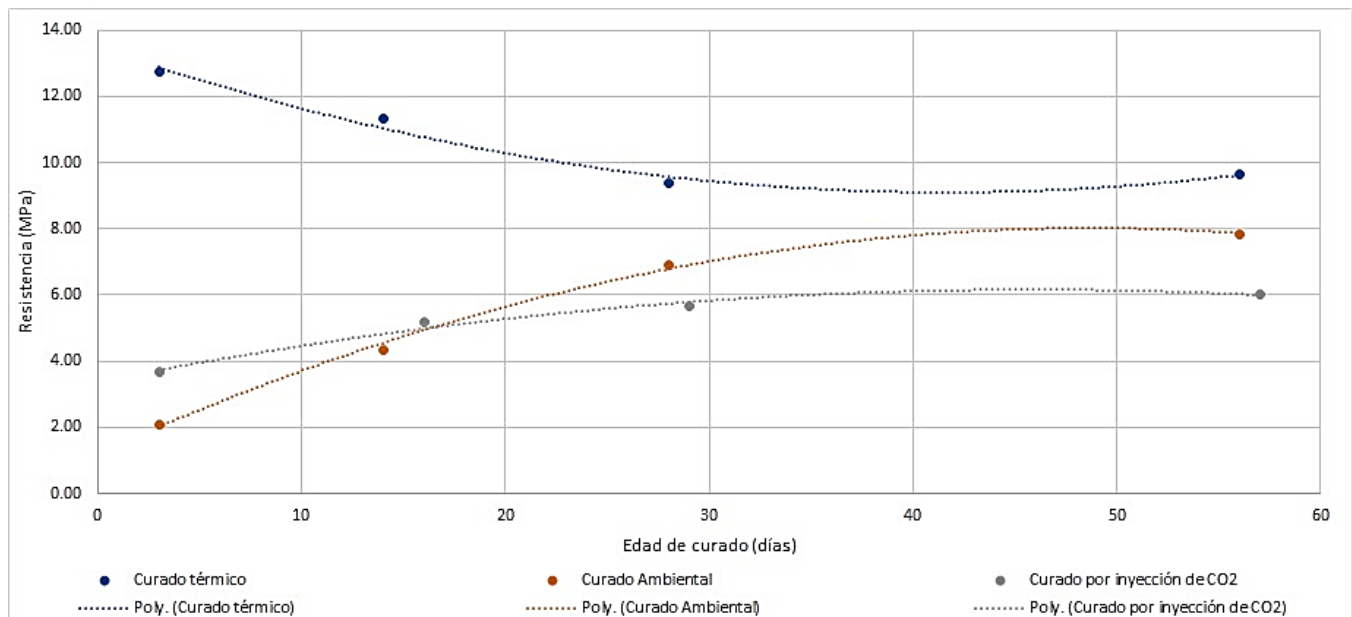


Figura 17. Variación de la resistencia a compresión del hormigón geopolimérico en función del tipo y edad de curado

Lo primero que resalta es que el curado térmico contribuye de forma más significativa al desarrollo de la resistencia a la compresión del hormigón geopolimérico que los curados con CO₂ y ambiental. Además, es notorio que mientras que en estos dos últimos métodos de curado la resistencia incrementa progresivamente en el tiempo, en el curado térmico, por el contrario, la resistencia decrece con el tiempo de curado. Estos diferentes comportamientos, sugieren que tanto en el curado con CO₂ y como en el curado ambiental, a edades tempranas la cantidad de productos de las reacciones de hidratación del cementante es baja, pero conforme transcurre el tiempo su cantidad aumenta por procesos cinéticos conduciendo al aumento progresivo en la resistencia a la compresión.

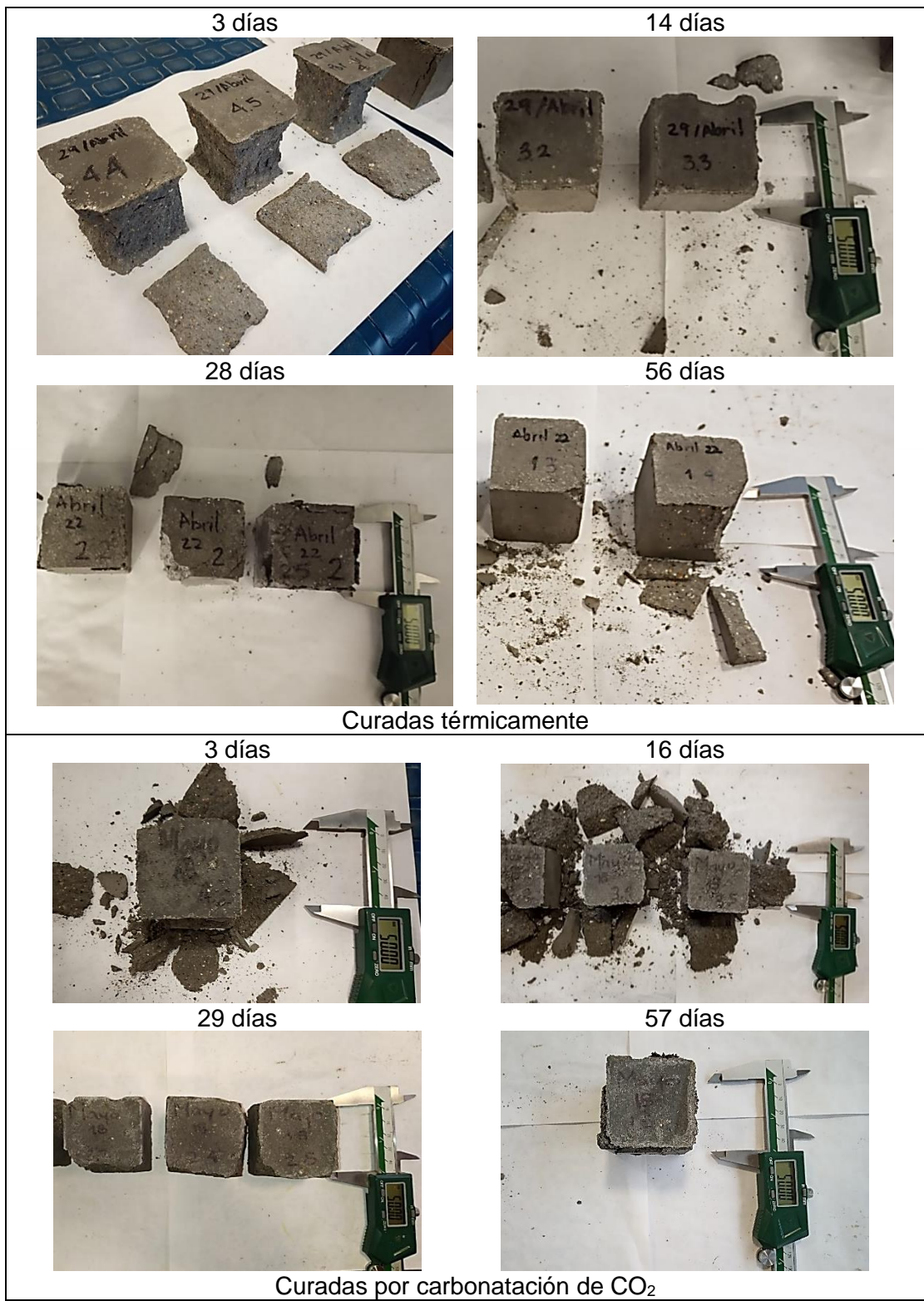
También es posible ver, que antes de los 14 días de curado por carbonatación con CO_2 , las resistencias a compresión desarrolladas son mayores que aquellas obtenidas mediante curado ambiental. No obstante, entre los 14 y 56 días la tendencia se invierte, mostrando que las resistencias logradas con el curado ambiental crecen más significativamente que con el curado por carbonatación con CO_2 . Una causa, plausible de este comportamiento podría asociarse a que, en las edades tempranas durante el curado por carbonatación, el ácido carbónico producido por interacción del CO_2 gaseoso con el agua contenida en las probetas, favorece la rápida formación de geles geopoliméricos o carbonatos duros que mejoran la resistencia a la compresión. Posterior a los 14 días los geles formados taponen los poros reduciendo la difusión del agua por capilaridad a través de los poros internos; por lo tanto, se disminuye la cinética de reacción para formar nuevos productos de hidratación responsables del incremento de temperatura. En el curado ambiental, la difusión de agua es más lenta pero las reacciones de hidratación son más progresivas y eficientes, porque posiblemente la porosidad interna no disminuye tan rápido.

En el curado térmico, lo que puede estar sucediendo, es que en las primeras 48 horas de curado dentro del horno, la cinética de formación de los geles geopoliméricos es impulsada por la mayor temperatura. El descenso progresivo de la resistencia a la compresión puede ser inducida por disolución de geles o aumento de la porosidad, causada por agua absorbida en la cámara de postcurado.

En este punto, es prudente recordar que como se mencionó en la metodología, independiente del método de curado practicado, todas las probetas completaron el curado desde el segundo día en cámaras cerradas con presencia de humedad. En consecuencia, la humedad que haya sido absorbida por las probetas hasta completar los 56 días de curado favoreció la formación de geles poliméricos y otros productos de hidratación del cementante en aquellas condiciones de curado en los cuales la cinética de difusión y reacción de las especies minerales implicadas es lenta y progresiva, tal es el caso de los curados con CO_2 y el ambiental.

Finalmente, es posible ver (Figura 17) que, para los tres tipos de curado implementados, la resistencia a la compresión tiende a estabilizarse a partir de los 40 días de postcurado. En orden descendente, las resistencias a compresión promedio son 6 MPa, 8 MPa y 9 MPa para los curados por carbonatación con CO_2 , ambiental y térmico; lo que se traduce en una ganancia de 11% de resistencia con el curado térmico sobre el curado ambiental y de 25% de resistencia con el curado ambiental sobre el curado por carbonatación con CO_2 . Parece ser que el proceso de postcurado en la cámara ambiental, no produjo un beneficio apreciable en las resistencias finales de los hormigones geopoliméricos expuestos a los curados térmico y por carbonatación. Posiblemente, el agua absorbida por las probetas pudo tener efecto adverso en las resistencias a compresión, a excepción de aquellas sometidas desde el inicio al curado ambiental. Para tener mayor comprensión de este fenómeno habría que estudiar la evolución de las resistencias de los hormigones geopoliméricos sometidos a los tres curados, pero sin el postcurado en la cámara ambiental o en condiciones de menor humedad relativa. Además, para demostrar la validez de esta presunción es necesario realizar análisis controlados de porosidad y de microscopia SEM los cuales por tiempos y presupuesto se salían del alcance del trabajo de grado.

En la Figura 18, se aprecian las imágenes de las probetas falladas a compresión para las cuatro edades correspondientes a los tres métodos de curado implementados.



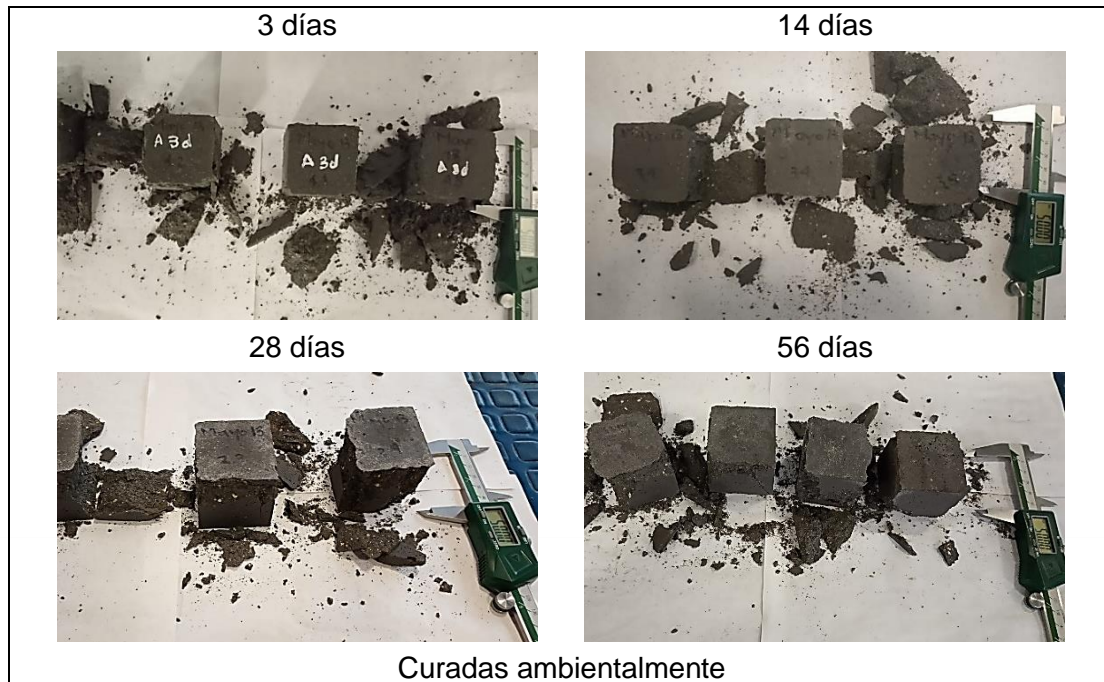
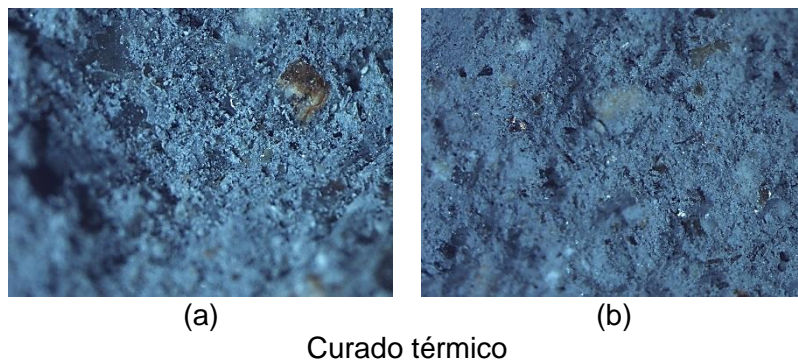


Figura 18. Fallas de las muestras

El modo de falla observado, en todas las probetas independiente de la edad y el método de curado, corresponden con fallas cohesivas por consolidación, en forma de reloj de arena con presencia de muy escasa porosidad vista sobre sus caras expuestas. En las superficies de fractura fue posible constatar, por simple inspección visual directa que, varios agregados se fracturaron internamente pero su unión con la pasta cementante era firme, como se muestra en la Figura 19. Esto sugiere la formación de una interfaz de unión muy adherente entre el agregado y el cementante geopolimérico, que permite la transferencia adecuada de la carga aplicada por compresión.



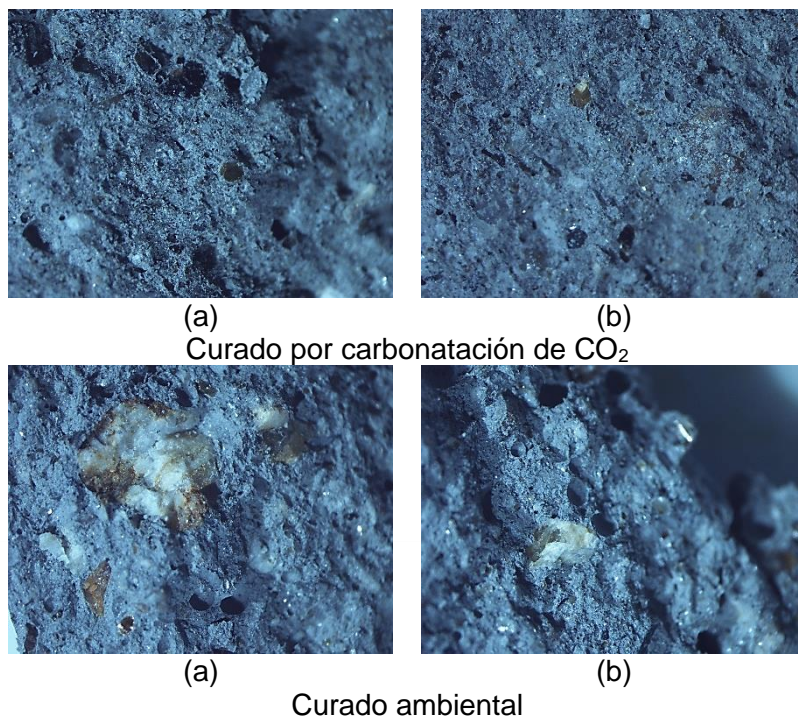


Figura 19. Superficies de fractura.

Durante la toma de registros de masa y dimensiones pudo observarse que, dependiendo del método de curado, la coloración gris de las probetas difería ligeramente; así el color más oscuro correspondió con las probetas llevadas a curado ambiental desde su conformación; por el contrario, las de color gris más tenue fueron las probetas curadas térmicamente; en tanto que, las probetas curadas por carbonatación mostraron una tonalidad intermedia. Lo anterior puede asociarse con un efecto óptico causado por el contenido de humedad, en otras palabras, durante todo el periodo de postcurado, las probetas expuestas a curado ambiental contenían en su volumen mayor cantidad de agua; mientras que las probetas expuestas al curado térmico tenían el menor contenido de agua. Las probetas llevadas al curado ambiental también mostraron condensación de agua sobre sus caras expuestas a la atmosfera húmeda dentro de la cámara de postcurado; fenómeno no apreciado en las probetas expuestas a los otros dos métodos de curado. Toda esta fenomenología, sugiere que el contenido de humedad en las probetas expuestas a curado ambiental promovió la formación lenta pero progresiva de productos de reacciones de hidratación que condujo al incremento continuado de su resistencia a compresión. En contraste, en las probetas expuestas al curado térmico, el vapor producido aceleró la cinética de reacción que condujo a la rápida formación de alta cantidad de productos de hidratación, entre ellos geles geopoliméricos que reducen la porosidad interna e incrementaron la resistencia en edades tempranas como lo menciona Erich Rodríguez en su trabajo de investigación titulado “Eficiencia de activadores alcalinos basados en

diferentes fuentes de sílice para la producción de sistemas geopoliméricos de ceniza volante” realizado en 2009 (Rodríguez M. et al., 2009). La caída de la resistencia de estas probetas durante el postcurado, posiblemente se deba la absorción de humedad que se difunde al interior a través de su porosidad interna. Algo similar pudo suceder en las probetas expuestas al curado por carbonatación, ya que en las primeras 48 horas, en presencia del CO_2 pudieron formarse rápidamente geles de carbonatos y silicatos complejos que reducen la porosidad interna y aumentaron la resistencia más que en el curado ambiental.

Sin embargo, en el postcurado el incremento progresivo de resistencia fue menor que con el curado ambiental, posiblemente porque el agua absorbida en el postcurado, y la cual se difundió a través de los poros internos fue menor y condujo a la formación de menor cantidad de productos duros de hidratación hacia las edades finales del curado.

Por otro lado, en la superficie de las probetas expuestas al curado ambiental, se evidenció la formación de cristales similares a eflorescencia; mismos que no fueron observados en ninguna de las probetas expuestas a curado térmico. En algunas de las probetas curadas por carbonatación, exhibieron una formación muy escasa de dichos cristales. La morfología y composición química de estas eflorescencias no se analizaron porque el costo y tiempo de los ensayos requeridos se salen del alcance de este trabajo de grado. Sin embargo, se supone que pueden ser cristales formados por exceso de silicatos de sodio y la alta concentración de la solución activadora del hidróxido de sodio (14 M) utilizada en la fabricación del hormigón geopolimérico. El mecanismo plausible, es la migración hacia la superficie de silicatos y en menor proporción de carbonatos solubles que, no reaccionaron para formar los geles geopoliméricos y debido al cambio de condiciones termodinámicas forman los cristales superficiales en las caras de las probetas durante su permanencia en la cámara de postcurado. La presencia de esta eflorescencia solamente en aquellas probetas expuestas al curado ambiental, que son las de mayor contenido de humedad, parece apoyar la hipótesis de que la resistencia a la compresión de las probetas, expuestas a los tres métodos de curado, es afectada por la cantidad de geles geopoliméricos y el contenido de humedad, lo cual se relaciona directamente con la evolución cinética de las reacciones de hidratación y geopolimerización asociadas al método de curado implementado.

4.2 VARIACIÓN DE MASA

Los resultados de variación gravimétrica de las probetas se muestran en la Figura 20 cada línea de tendencia muestra los resultados obtenidos de los ensayos realizados teniendo en cuenta cada uno de los métodos de curado.

Los registros de las mediciones realizadas durante todo el tiempo de curado se consignan en el ANEXO 7, en el ANEXO 8 y en el ANEXO 9 en donde se pueden consultar los valores exactos de cada medición y los valores promedios que son graficados.

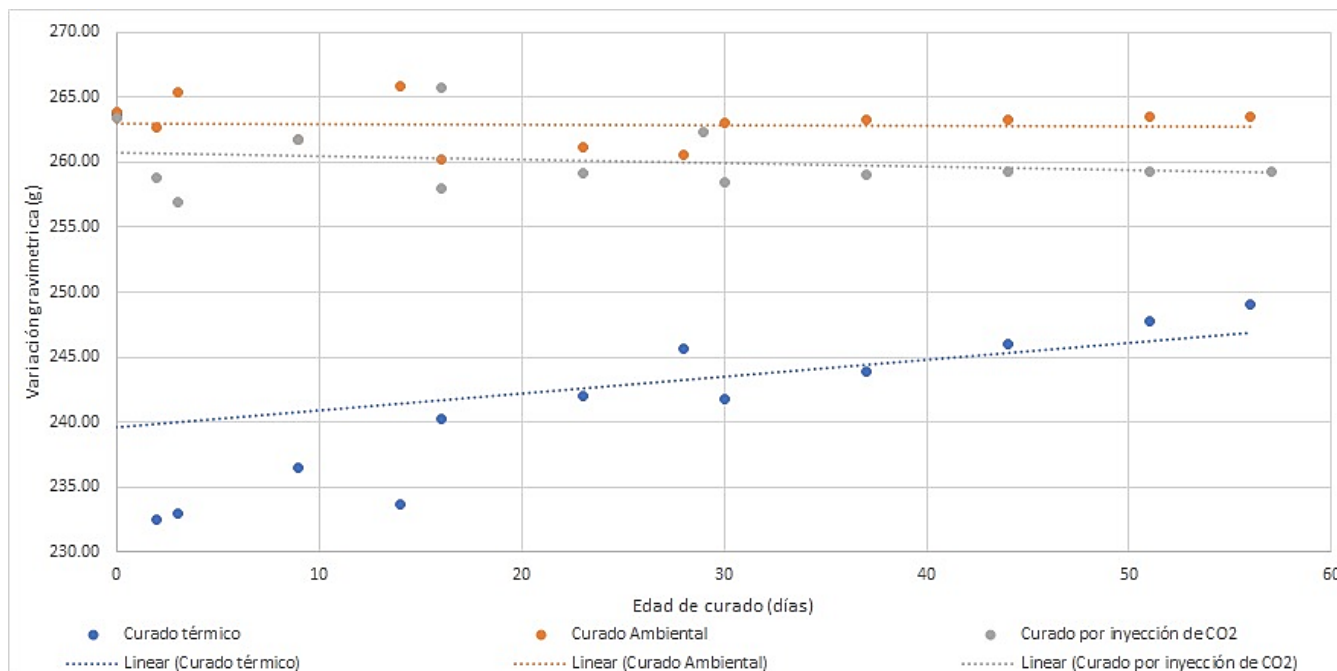


Figura 20. Variación de masa en las muestras

En la Figura 20 es posible ver que la mayor masa corresponde a probetas expuestas al curado ambiental, ligeramente menor es la masa registrada para probetas expuestas a curado por carbonatación; siendo notable la reducción de masa de las probetas expuestas a curado térmico que es bastante menor. Los cambios de masa en las probetas son debidos, fundamentalmente, a su contenido de humedad. Durante el curado térmico, rápida evaporación del agua genera microporosidad, baja la masa y simultáneamente promueve la rápida formación de geles geopoliméricos. Luego, en la cámara de postcurado, las probetas absorben gradualmente agua desde la atmosfera húmeda que las rodea causando el incremento de masa observado. En el curado ambiental, las probetas no muestran variación apreciable de su masa, posiblemente porque las probetas están saturadas de agua; de modo que el agua consumida en las reacciones de hidratación y geopolimerización es repuesta por el aquella absorbida desde la atmosfera circundante. En las probetas curadas por carbonatación se observa un ligero descenso de masa; la única explicación probable sería que, el agua contenida en la probeta va siendo gradualmente consumida en reacciones de hidratación y de geopolimerización; pero el agua absorbida del entorno es menor, según la investigación realizada en el 2012 por Shi, He & Wu, los productos formados posiblemente reduzcan la porosidad interna, restringiéndose así la difusión de agua absorbida desde la superficie hacia el interior de las probetas (Shi, He, & Wu, 2012). Esta hipótesis, es reafirmada en cierta forma por los resultados del ensayo de absorción de agua presentados en la Tabla 3.

4.3 CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA

Los resultados de variación volumétrica de las probetas se muestran en la Figura 21 cada línea de tendencia muestra los resultados obtenidos de los ensayos realizados teniendo en cuenta cada uno de los tipos de curado.

Los registros de las mediciones realizadas durante todo el tiempo de curado se encuentran en el ANEXO 10, en el ANEXO 11, y en el ANEXO 12 en donde se pueden consultar los valores exactos de cada medición y los valores promedios que son graficados.

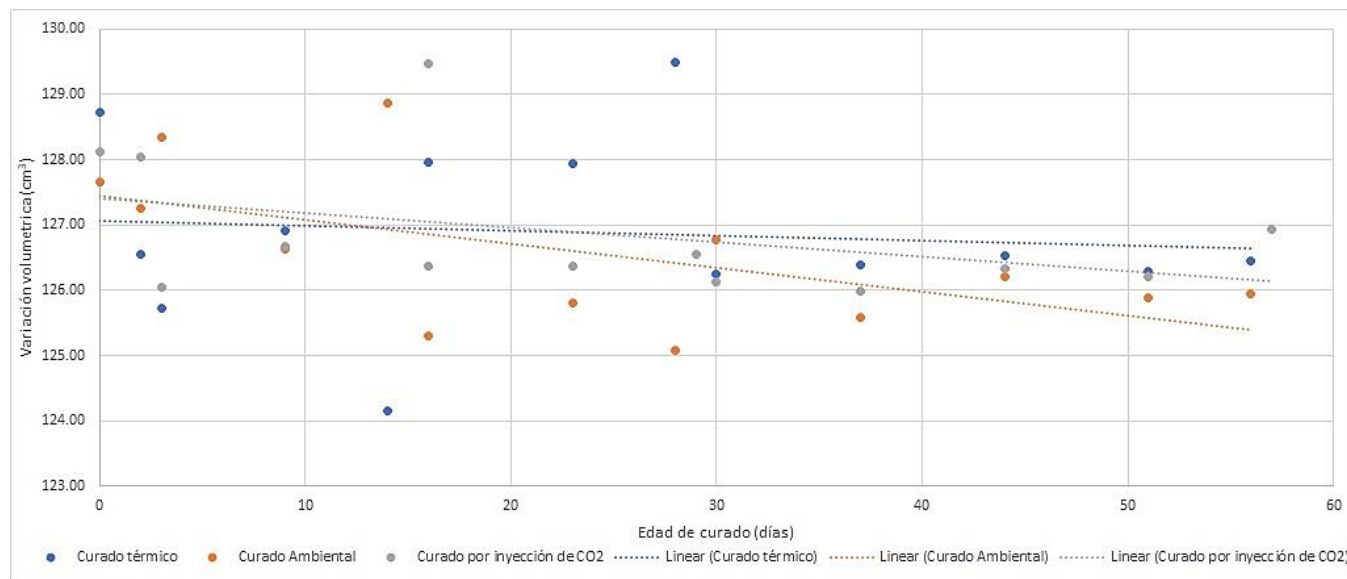


Figura 21. Variación volumétrica de las muestras

En la Figura 21 se pueden observar dos patrones, el primero la dispersión de las muestras curadas térmicamente es mayor, por el contrario, las muestras curadas por carbonatación de CO₂ muestran una dispersión menor. En el segundo patrón, si se toma como referencia los ajustes de las líneas de tendencia, se aprecia que para los tres métodos de curado se manifiesta contracción volumétrica conforme transcurre el periodo de curado.

La mayor contracción se evidencia en las probetas expuestas a curado térmico (-1.77% en volumen); mientras que la menor contracción se observa para las probetas expuestas a curado por carbonatación de CO₂ (-0.93% en volumen). En las probetas curadas ambientalmente, la contracción está en un valor intermedio (-1.35% en volumen) al arrojado por los otros dos métodos de curado.

La contracción, se asocia principalmente a la pérdida de humedad por reacciones de hidratación en edades tempranas del curado y luego por evaporación y transpiración impulsadas por el calor de hidratación. Nótese que, en la etapa inicial del curado térmico, ya las dimensiones de las probetas son menores que los registrados en las probetas curadas por los otros dos métodos que, son prácticamente iguales. Las diferencias en la contracción observadas (Figura 21), podrían estar asociadas a que, curado térmico, seguido del curado por carbonatación, en menor medida, inducen la formación de redes tridimensionales de geles geopoliméricos insolubles rígidos los cuales restringen a la retracción volumétrica por pérdida de humedad.

4.4 ENSAYO DE ABSORCIÓN DE HUMEDAD

El ensayo de absorción de humedad fue realizado siguiendo la NTC 4017, la absorción de humedad de las probetas fue determinada mediante cálculos gravimétricos como se evidencia en la Tabla 3. Como

se mencionó en la sección 3.6, las muestras de hormigón geopolimérico se ingresaron en el horno durante 24 horas, para asegurar la pérdida de agua residual y alcanzar el peso de las probetas completamente secas, posteriormente se ingresaron en agua durante 24 horas para obtener el peso de las muestras cuando están saturadas de agua cuyos valores se consignan en la Tabla 3.

Finalmente, haciendo uso de la siguiente formula se determina el porcentaje de absorción de humedad de las probetas, el cual se evidencia en la Tabla 3.

$$\% \text{ de absorción de humedad} = \frac{M_{sat} - M_{seco}}{M_{seco}} * 100$$

Tabla 3. Comparación porcentajes de absorción de humedad.

Muestras dependiendo tipo de curado	Masa seca (g)	Masa saturada (g)	% de absorción de humedad
Curado térmico	157.8	182.1	15.40%
Curado ambiental	168.4	193.9	15.14%
Curado por carbonatación de CO ₂	195.3	223.5	14.44%

Estos resultados muestran una leve variación entre ellos, que solo pueden asociarse a diferencias de porosidad en las probetas ensayadas, que corresponden únicamente a una muestra de aquellas curadas hasta 28 días. Por lo tanto, no se puede concluir con certeza sobre posibles cambios en la absorción de humedad con el transcurso del tiempo de curado.

Al relacionar la Figura 17 y la Figura 20, puede encontrarse que existe incidencia del agua absorbida por las probetas durante el postcurado sobre el cambio en su resistencia a la compresión; y ello posiblemente se deba al modo en que método de curado afecto la cinética de reacción entre los minerales de la ceniza volante y el silicato de sodio con la solución activadora y el agua de hidratación disponible. En términos más amplios, las probetas expuestas a curado térmico redujeron su resistencia conforme incremento su masa por absorción de agua, posiblemente porque haya ocurrido disolución de algunos componentes que no formaron productos de hidratación ni geles geopoliméricos. En las probetas expuestas al curado ambiental las condiciones de humectación continua favorecieron la formación progresiva de productos de hidratación y geles geopoliméricos hasta edades avanzadas del curado. En las probetas curadas por carbonatación con CO₂ la menor absorción de agua condujo a una cinética más lenta en formación de los productos de hidratación y de los geles geopoliméricos; de allí que a mayores edades la resistencia fuera menor que la desarrollada por las probetas curadas ambientalmente.

En resumen, los resultados alcanzados para responder la pregunta de investigación muestran que el curado térmico a 60°C tuvo un efecto más positivo que el curado por carbonatación con CO₂ sobre las propiedades físicas y mecánicas del hormigón geopolimérico preparado a base de cenizas volantes y silicato de sodio líquido. Los reportes de la literatura sobre el curado por carbonatación de concretos base cemento Portland, informan que con este método se desarrollan resistencias muy comparables a las obtenidas en el curado térmico; además de ser un proceso energéticamente más económico y amigable con el ambiente.

El hecho de que en la experimentación realizada en este trabajo de grado no se lograran resistencias comparables entre el curado térmico y el curado por carbonatación con CO_2 puede explicarse en función de la composición mineral de la ceniza volante utilizada y de la baja permeabilidad al CO_2 de la mezcla geopolimérica obtenida. En el primer caso, al consultar su composición química de la ceniza volante (ANEXO 1. Caracterización de la ceniza volante utilizada. ANEXO 1), se deduce que contiene muy poco calcio (Ca) para reaccionar con el CO_2 ; por ende, se produciría una baja cantidad de carbonatos de calcio (CaCO_3) duros los cuales incrementan la dureza y resistencia del hormigón geopolimérico. En el segundo caso, según la investigación realizada por Shi, He & Wu en 2012, se requiere que la mezcla cementante tenga una cantidad optima de agua, ni más ni menos, para formar por combinación con el CO_2 , el ácido carbónico (H_2CO_3) que al difundirse reacciona con el cementante para formar CaCO_3 (Shi, He, et al., 2012). Sin embargo, se observó que el hormigón, recién elaborado, poseía una elevada viscosidad que fue incrementando durante las primeras 24 horas de conformación de las probetas. La alta viscosidad del hormigón condujo a una reducción del agua libre requerida para formar H_2CO_3 y habría restringido su difusión al interior de las probetas; de modo que el CaCO_3 se formó, principalmente, bajo la superficie de las probetas.

Para corroborar estas explicaciones es recomendable realizar ensayos controlados de absorción de humedad en cámaras ambientales con control preciso de la humedad. También, es conveniente medir la profundidad de carbonatación mediante análisis termogravimétricos y con ataque con indicador químico asociados a microscopias de alta resolución. En los resultados de variación volumétrica y de masa, no se descarta que, durante la preparación de las probetas, diferencias en la proporción de agua adicionada para ajustar la fluidez de la pasta geopolimerizada haya inducido en las variaciones vistas.

Cabe resaltar que el protocolo seguido para el curado por carbonatación de CO_2 fue diferente al recomendado por la literatura disponible, esto debido a que la cámara de carbonatación sugerida debía ser sellada y purgada, es decir, dentro de la cámara de carbonatación solo debe haber CO_2 gaseoso (nada de aire común), y la utilizada era una cámara de carbonatación de paso. Este cambio en el protocolo de curado da cuenta de una posible causa del desempeño inferior de las probetas curadas por carbonatación de CO_2 .

5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

En este trabajo de grado se evaluó el efecto de los métodos de curado, térmico y por carbonatación con CO_2 , sobre las propiedades físicas y mecánicas de un hormigón obtenido por la geopolimerización de una mezcla de cenizas volantes y silicato de sodio activadas con solución 14M de hidróxido de sodio. Como patrón de comparación se utilizaron probetas del mismo hormigón expuestas a curado ambiental, las cuales se asemejan a las encontradas en la literatura de materiales geopoliméricos.

El curado térmico, indujo en el hormigón geopolimérico el desarrollo de resistencias a la compresión mayores que aquellas alcanzadas mediante el curado por carbonatación con CO_2 y con el curado ambiental. Al tercer día, las resistencias desarrolladas fueron 13 MPa, 4 MPa y 2 MPa, respectivamente para los curados térmico, por carbonatación y ambiental. Al transcurrir el tiempo, en una cámara sellada de postcurado en presencia de aire con la misma humedad relativa, Las probetas expuestas a los curados ambiental y por carbonatación incrementaron progresivamente su resistencia a la compresión; mientras que las probetas expuestas al curado térmico registraron la disminución progresiva de su resistencia. Antes de los 14 días de curado, las probetas expuestas a curado por carbonatación de CO_2 registraron resistencias mayores que aquellas curadas ambientalmente, pero la tendencia se invirtió de allí hasta completar los 56 días, siendo más resistentes las probetas curadas ambientalmente que sus símiles curadas por carbonatación.

Entre los 40 y 56 días de postcurado, la resistencia a la compresión de todas las probetas tiende a estabilizarse independientemente del método de curado implementado. A los 56 días, las resistencias a compresión promedio son 6 MPa, 8 MPa y 9 MPa, en ese orden para los curados por carbonatación con CO_2 , ambiental y térmico; lo que se traduce en una ganancia de 11% de resistencia con el curado térmico sobre el curado ambiental y de 25% de resistencia con el curado ambiental sobre el curado por carbonatación con CO_2 .

Las probetas expuestas al curado térmico mostraron el mayor porcentaje de contracción volumétrica (1.77) mientras las probetas expuestas al curado por carbonatación de CO_2 fueron las que menos contracción registraron (0.93). Las probetas expuestas al curado ambiental presentaron variaciones volumétricas intermedias (1.35) a las inducidas por los otros dos métodos de curado.

A partir de la relación entre el cambio de masa y la evolución de la resistencia a la compresión, durante el postcurado, se deduce que la ganancia o pérdida de resistencia es afectado por el contenido de humedad de las probetas. En el caso del curado térmico el descenso progresivo de resistencia se asocia con la disolución, en el agua absorbida por las probetas, de productos sin geopolimerizar. En el caso de los curados ambientales y por carbonatación la ganancia progresiva de resistencia es debida a la creciente y continua formación de productos de hidratación. Las menores resistencias alcanzadas por las probetas expuestas al curado por carbonatación entre los 14 y 56 días de postcurado, se explican porque la baja humectación conllevo a una escasa producción y difusión ácido carbónico (H_2CO_3) al interior de las probetas; como consecuencia de la alta viscosidad del mortero activado con la solución 14 M de hidróxido de sodio (NaOH). Sumando a lo anterior, la baja concentración de calcio en las cenizas volantes que limito la formación de cristales de carbonato de calcio (CaCO_3).

Las probetas expuestas al curado ambiental mostraron la formación de eflorescencias superficiales, las cuales solo se evidenciaron en muy escasa cantidad en las probetas expuestas al curado por carbonatación; en tanto que no se observó sobre las probetas expuestas a curado térmico. Estas

eflorescencias son formadas por minerales solubles del hormigón geopolimérico que se difunden hacia la superficie, impulsados por el alto contenido de humedad y la baja cinética de reacción, donde forman cristales que básicamente serían silicatos y aluminatos de sodio.

Las resistencias a los 56 días de los materiales evaluados resultan muy similares y están por debajo del valor mínimo de resistencia a la compresión para los estándares del hormigón convencional para uso de elementos estructurales, por lo tanto, se recomienda que de ser utilizado el material que fue objetivo de esta investigación solo puede hacerse para desarrollo de elementos no estructurales tales como bloques para muros divisorios, tope llantas, entre otros.

Es de aclarar que la incertidumbre encontrada en las mediciones de la variación volumétrica puede deberse a la herramienta utilizada, debido a que no siempre se utilizó el mismo pie de rey y por ende la calibración de estos podía ser diferente.

Para las futuras investigaciones a realizar se recomienda que si se desea mejorar la resistencia a la compresión y otras características de los hormigones geopoliméricos a base de ceniza volante sería conveniente añadir a la mezcla un material que sea fuente de calcio como lo son las escorias de procesos de fundición, algún suplemento de cal o cemento portland, entre otros. Además, se recomienda realizar mezclas con hidróxido de sodio de menor molaridad como 8M, esto para lograr que el hormigón geopolimérico tenga menor viscosidad y tenga suficiente tiempo para que el CO_2 , proveniente del curado por carbonatación de CO_2 , se combine con el contenido de humedad formando mayor cantidad de ácido carbónico requerido para las reacciones dentro del hormigón geopolimérico.

REFERENCIAS

- Abdel-Gawwad, H. A., & Abo-El-Enein, S. A. (2016). A novel method to produce dry geopolymer cement powder. *HBRC Journal*, 12(1), 13–24. <https://doi.org/10.1016/J.HBRCJ.2014.06.008>
- ACI Committee. (2016). *308R-16: Guide to External Curing of Concrete*. Retrieved from www.concrete.org
- Argos. (2017). Concreto. Retrieved September 23, 2018, from <https://www.argos.co/Productos/Concreto>
- Bakri, A. M. M. Al, Kamarudin, H., Binhussain, M., Nizar, I. K., Rafiza, A. R., & Zarina, Y. (2013). Comparison of Geopolymer Fly Ash and Ordinary Portland Cement to the Strength of Concrete. *Advanced Science Letters*, 19(12), 3592–3595. <https://doi.org/10.1166/asl.2013.5187>
- Burciaga-Díaz, O., Escalante-García, J. I., Magallanes-Rivera, R. X., Burciaga-Díaz, O., Escalante-García, J. I., & Magallanes-Rivera, R. X. (2015). Resistencia a la compresión y evolución microestructural de geopolímeros base metacaolín expuestos a alta temperatura. *Revista ALCONPAT*, 5(1), 58–73. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352015000100006
- Calleja, J. (1967). Tratamientos térmicos del hormigón. consejo superior de investigaciones científicas.
- CEMEX. (2017). Cement. Retrieved September 23, 2018, from <https://www.cemex.com/products-services/products/cement>
- Criado Sanz, M. (2007). *Nuevos materiales cementantes basados en la activación alcalina de cenizas volantes caracterización de geles N-A-S-H en función del contenido de sílice soluble: efecto del Na₂SO₄*. Universidad Autónoma de Madrid. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=30368>
- Davidovits, J. (1994). *PROPERTIES OF GEOPOLYMER CEMENTS*. Kiev. Retrieved from www.geopolymer.org
- Davidovits, J., Davidovits, R., & Davidovits, M. (2007). *US12374912*. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US8202362B2/en>
- Delatte, N. J., & Norbert Delatte, B. J. (2001). *Lessons from Roman Cement and Concrete. J.Prof.Issues Eng.Educ.Pract* (Vol. 127). Retrieved from http://engagedscholarship.csuohio.edu/encee_facpub
- Departamento de ingeniería metalúrgica. (n.d.). *Fundición de piezas*. Santiago de Chile . Retrieved from <http://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgia/files/paginas/capitulo21.pdf>
- Díaz, P. M., & Delfín A., F. (2012). *ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE OBTENCIÓN DE HORMIGONES GEOPOLIMERICOS A PARTIR DE DESECHOS MINERALES*. Universidad de Chile.
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., & van Deventer, J. S. J. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete.' *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1590–

1597. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2007.08.018>

- Foulsham, G. (2016). *UCLA researchers turn carbon dioxide into sustainable concrete* | UCLA. Los Angeles. Retrieved from <http://newsroom.ucla.edu/releases/ucla-researchers-turn-carbon-dioxide-into-sustainable-concrete>
- Giraldo B., O. (2013). Manual de agregados para el concreto | CivilGeeks.com. Retrieved September 23, 2018, from <https://civilgeeks.com/2013/10/17/manual-de-agregados-para-el-concreto/>
- González Zuluaga, R. (2018). *Mortero geopolimérico aligerado con espuma rígida de poliuretano*. Universidad EIA. Retrieved from <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/2102>
- iCO2 Lab Co.Ltd. (n.d.). CO2 Eco-Structure | iCO2 Lab Co. Ltd. Retrieved May 23, 2018, from <http://www.ico2.jp/en/products/>
- Kaliyavaradhan, S. K., & Ling, T. C. (2017). Potential of CO2 sequestration through construction and demolition (C&D) waste - An overview. *Journal of CO2 Utilization*, 20(May), 234–242. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.05.014>
- Lee, J. C., Song, H., Kim, B. Y., Song, T. H., & Seo, C. H. (2016). The application of CO2 in the curing process of cement brick products. *Journal of Ceramic Processing Research*, 17(1), 17–25.
- McLellan, B., Williams, R., Lay, J., Van Riessen, A., & Corder, G. (2011). Costs and carbon emissions for geopolymmer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 19(9–10), 1080–1090. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>
- Mo, L., Zhang, F., & Deng, M. (2016). Mechanical performance and microstructure of the calcium carbonate binders produced by carbonating steel slag paste under CO2 curing. *Cement and Concrete Research*, 88, 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.05.013>
- Montalvo Peña, H. (n.d.). CONCRETO: Generalidades, propiedades y procesos. Academia. Retrieved from https://www.academia.edu/9706247/CONCRETO_Generalidades_propiedades_y_procesos
- Muñoz V., M. del S., Manzano R., A., Gasca, J. R., & Rubio A., J. C. (2011). Geopolímeros para un desarrollo sustentable. Retrieved September 23, 2018, from <http://www.cyd.conacyt.gob.mx/249/articulos/geopolimeros-para-un-desarrollo-sustentable.html>
- Nataatmadja, A. (2015). *Development of low-cost fly ash bricks*. Queensland.
- Palomo, A., Krivenko, P., Garcia-Lodeiro, I., Kavalerova, E., Maltseva, O., & Fernández-Jiménez, A. (2014). A review on alkaline activation: new analytical perspectives ; Activación alcalina: Revisión y nuevas perspectivas de análisis. *Materiales de Construcción*, 64(315), 22. <https://doi.org/10.3989/mc.2014.00314>
- Provis, J. L., Palomo, A., & Shi, C. (2015). Advances in understanding alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 78, 110–125. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.013>
- Rivera, J. F., Mejia, J. M., Mejia de Gutierrez, R., & Gordillo, M. (2014). *Hybrid cement based on the*

alkali activation of by-products of coal Cementos híbridos basados en la activación alcalina de subproductos del carbón (Vol. 13). Cali. Retrieved from <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rconst/v13n2/art04.pdf>

Robayo, E. (2013). *COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DURABILIDAD DE MORTEROS DE CENIZAS VOLANTES ACTIVADAS ALCALINAMENTE*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL BOGOTÁ DC. Retrieved from <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/11159/RobayoNunezEstefania2013.pdf?sequence=1>

Rodriguez M., E. D., Paya B., J., & Monzó B., J. M. (2009). *EFICIENCIA DE ACTIVADORES ALCALINOS BASADOS EN DIFERENTES FUENTES DE SILICE PARA LA PRODUCCION DE SISTEMAS GEOPOLIMERICOS DE CENIZA VOLANTE*. Universidad Politécnica de valencia. Retrieved from [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13854/Documento Tesina Erich Rodriguez 2009.pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13854/Documento%20Tesis%20Erich%20Rodriguez%202009.pdf?sequence=1)

SAINET. (2106). Manufacturas Siliceas S.A.S. Retrieved August 13, 2019, from <http://www.siliceas.com/soluciones>

Shi, C., He, F., & Wu, Y. (2012). Effect of pre-conditioning on CO₂ curing of lightweight concrete blocks mixtures. *Construction and Building Materials*, 26(1), 257–267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.020>

Shi, C., Wang, D., He, F., & Liu, M. (2012). Weathering properties of CO₂-Cured concrete blocks. *Resource, Conservation and Recycling*, 65, 11–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.04.005>

Valenzuela H., M. E. (2013). *ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DE GEOPOLÍMEROS SINTETIZADOS A PARTIR DE PUZOLANA NATURAL*. Universidad de Chile. Retrieved from http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/114679/cf-valenzuela_mh.pdf?sequence=1

Vijai, K., Kumutha, D. R., & Vishnuram, D. B. G. (n.d.). Influence of Curing Types on Strength of Geopolymer Concrete.

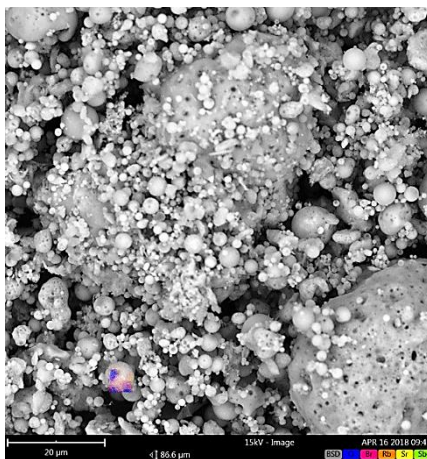
Zhan, B. J., Poon, C. S., & Shi, C. J. (2016). Materials characteristics affecting CO₂ curing of concrete blocks containing recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 67, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.12.003>

Zhan, B. J., Xuan, D. X., Poon, C. S., & Shi, C. J. (2016). Effect of curing parameters on CO₂ curing of concrete blocks containing recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 71, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.002>

ANEXOS

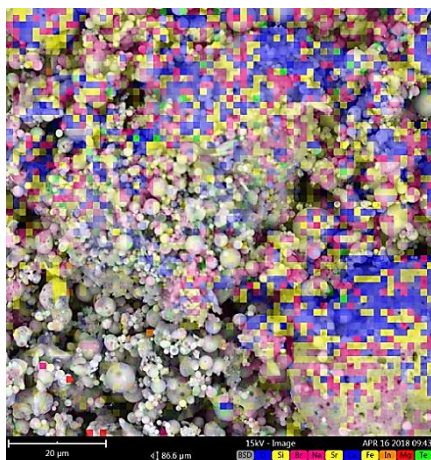
ANEXO 1. Caracterización de la ceniza volante utilizada.

1. Microscopia SEM de las cenizas volantes



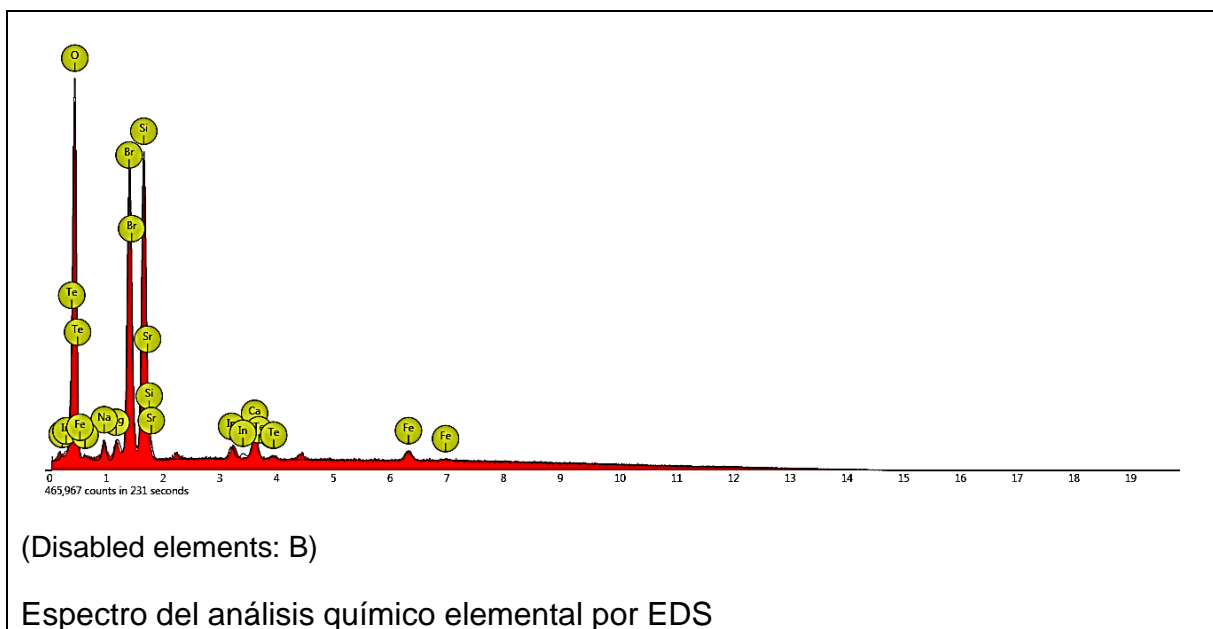
FOV: 86.6 μm , Mode: 15kV - Image, Detector: BSD Full, Time: APR 16 2018 09:43

2. Mapa de composición elemental EDS Combined map



Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
O	69.90	43.97		
Si	15.26	20.30	Si	35.05
Br	8.94	11.43	Br	58.44
Na	1.24	1.35	Na	2.32
Sr	1.19	4.94	Sr	8.51
Ca	1.11	2.11	Ca	3.64
Fe	1.02	2.70	Fe	4.68
In	0.65	3.54	In	6.12
Mg	0.58	0.67	Mg	1.15

FOV: 86.6 μm , Mode: 15kV - Image, Detector: BSD Full, Time: APR 16 2018 09:43



ANEXO 2. Ficha técnica ceniza volante.



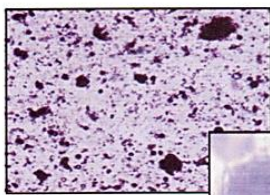
CENIX



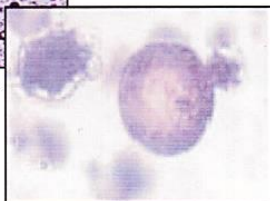
CRA. 32 No. 1B SUR 51 OF. 515 ED. MALL VENTURA PBX 352 53 62 e-mail: ahinco@une.net.co

DESCRIPCIÓN:

Es una ceniza volante de color gris, sólida, fina y de forma esférica, resultante de la combustión del carbón molido o en polvo tipo bituminoso, que tiene propiedades puzolánicas (cementantes) que se activan al reaccionar el hidróxido de calcio (cal) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ producido durante la hidratación del cemento Portland con los silicatos solubles de álcali o "cristales" de la ceniza.



Partículas aglomeradas de Ceniza Volante (4X)



Cenosferas en Ceniza Volante al microscopio (63X)

ESPECIFICACIONES:

Para el detalle de las especificaciones técnicas, referenciarse a la norma técnica colombiana NTC 3493, que es idéntica a la norma ASTM-C 618.

USOS:

- Como adición al cemento Portland.
- Como adición al hormigón utilizado para estructuras de concreto o al mortero utilizado para los acabados.
- Como adición en la fabricación de bloques prefabricados con cemento Portland.
- Como adición en la fabricación de ladrillos de arcilla.
- Como adición en las bases granulares para pavimentos semiflexibles de carreteras, autopistas, pistas de aterrizaje y estacionamientos.
- En la inyección de pozos petrolíferos.
- En la reducción de la acidez de los suelos (agricultura).

VENTAJAS:

Bajo determinadas condiciones, como adición en el hormigón, brinda las siguientes ventajas:

- Se logran las mismas o mayores resistencias a la compresión a los 28 días de fraguado el hormigón, que una mezcla de control tradicional, con menores consumos de cemento por m^3 y por tanto menores costos.

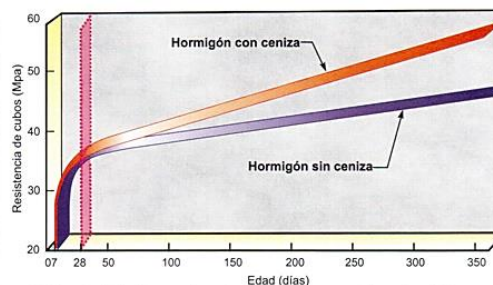


Gráfico 1. Relación entre la resistencia a la compresión y la edad para hormigones con y sin ceniza volante.

- A edades de fraguado posteriores a los 28 días, se logran mayores resistencias a la compresión que las mezclas de hormigón tradicional. Gráfico 1.
- Por su finura y forma esférica, permite reducir la cantidad de agua necesaria de la mezcla tradicional, Gráfico 2, obteniendo la misma trabajabilidad. Además, mejora la aptitud de bombeo de la mezcla por medios mecánicos, ya que disminuye la fricción entre las partículas de los áridos y entre el hormigón y la tubería.

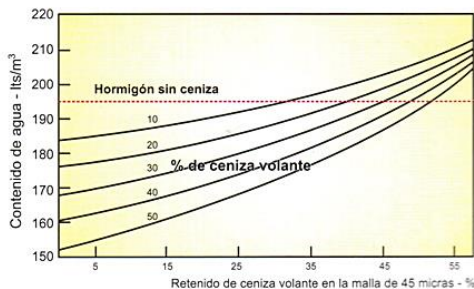



Gráfico 2. Efecto del retenido de ceniza volante sobre el contenido de agua de un hormigón cuyo asentamiento es de 5 a 7.5 cm. con un consumo de cemento de 300 Kg/m^3 al cual se le agregaron diversos porcentajes de ceniza volante.

ANEXO 3. Ficha técnica silicato de sodio.

	FICHA TÉCNICA SILICATO DE SODIO SPINPEG- 421	Código: FO-GP-025
		Versión: 002
		Página 1 de 1

DESCRIPCIÓN Y USOS DEL PRODUCTO:

El silicato de Sodio SPINPEG-421 tiene un contenido alto de sílice polimérico, lo que lo hace muy útil como adhesivo en la industria del cartón y papel aportando rigidez y resistencia en la elaboración de tubos, tambores, tableros de cartón, entre otros. También sirve para la unión de cartón o papel con aluminio laminado.

Otras aplicaciones industriales:

- Impermeabilizante, endurecedor y acelerantes de fraguado para el concreto.
- Aglutinante de lodos en la perforación de pozos petroleros.
- Ingrediente importante en la fabricación de refractarios especiales y morteros, debido a que aumentan la resistencia al ataque de productos químicos.
- Usados en la fabricación de varios tipos de cementos, pinturas y recubrimientos.
- Agente Floculante en tratamiento de aguas.

PROPIEDADES FÍSICAS

Apariencia	Líquido viscoso
Color	Ligeramente grisáceo
Olor	Inodoro

ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO:

	MÍNIMO	MÁXIMO
Densidad (°Be):	40.5	44.5
Relación (SiO ₂ : Na ₂ O):	3.0	3.27
Na ₂ O (%):	8.76	9.98
SiO ₂ (%):	27.40	30.25
Sólidos Totales (%):	36.80	40.00

PRESENTACIÓN:

El producto es entregado en carrotanques de 10 a 30 toneladas, tambores metálicos de 300 kg y tambores plásticos de 150 y 200 kg.

ADVERTENCIA:

Spin S.A. garantiza el producto bajo las especificaciones técnicas establecidas en esta ficha, pero no puede garantizar las condiciones de aplicación, usos y cambios en el proceso sobre el cual fue evaluado el producto, ya que son propias de cada cliente.

Página 1 de 1

Última revisión: 21/06/2016

ANEXO 4. Hoja de seguridad silicato de sodio.



HOJA DE SEGURIDAD SILICATO DE SODIO



1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO Y LA COMPAÑÍA

Nombre del producto:	SPINPEG 421
Nombre químico:	Silicato de sodio Alcalino
Fórmula:	Silicato de sodio neutro 42° Be - Relación peso 3.1
Numero UN:	No asignado.
Identificación de la empresa:	SPIN S.A. - Silicatos para Industria S.A. Cra 43 A N° 61 Sur 30 Sabaneta- Antioquia Tel. 5904006 Cel: 314-830-0417 info@spinusa.com.co
E-mail:	
Teléfono para emergencias:	123

2. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

ASPECTOS DE SEGURIDAD	Líquido espeso, inodoro, grisáceo. Causa irritación severa en los ojos. Causa irritación moderada en la piel. Los vapores pueden causar irritación en el tracto respiratorio. Debido al alto pH del producto es peligroso para la vida acuática.
Contacto con los ojos:	Causa irritación severa en los ojos.
Contacto con la piel:	Causa irritación moderada en la piel
Inhalación:	El vapor irrita el tracto respiratorio.
Ingestión:	Podría causar irritación de la boca, esófago y estómago.
Peligros crónicos:	No se conocen peligros crónicos
Peligros físicos:	Beco forma una película de vidrio el cual puede cortar fácilmente la piel. El material derramado es muy resbaladizo. Si no se remueve rápidamente puede formar vidrio.

3. COMPOSICIÓN DEL PRODUCTO

Sustancia	%	Nº CAS	Símbolos de riesgo
Na ₂ O3.18H ₂ O	38.70	1344-09-8	XI (Irritante)
			R36/38 (Irrita los ojos y la piel)



4. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

Contacto con los ojos:	Lavarlos con abundante agua, durante 15 minutos aproximadamente procurando abrir y cerrar los ojos intermitentemente. Acudir al médico si es necesario.
Contacto con la piel:	En caso de contacto, lavar inmediatamente la piel con abundante agua por al menos 15 minutos. Si se presenta irritación o si hay dolor se debe buscar atención médica.
Inhalación:	Mover a la persona al aire fresco. Si no está respirando, darle respiración artificial. Si hay dificultad para respirar suministrar oxígeno. Buscar ayuda médica.
Inyección:	No provocar vómito. Obtenga atención médica inmediatamente. Si la víctima está plenamente consciente darle de beber abundante agua y de ser posible ligeramente acidulada con vinagre o limón. Nunca de a ingerir nada a una persona inconsciente.

5. MEDIDAS CONTRA INCENDIO

Medios de extinción:	El producto NO es combustible. En caso de incendio en el entorno están permitidos todos los agentes extintores.
Elementos de protección:	Quando este material esté presente en un área de fuego, se debe usar guantes de resistencia química, ropa de protección que recubra completamente el cuerpo y botas de caucho.

6. MEDIDAS PARA FUGAS O DERRAMES ACCIDENTALES

Protección personal:	Usar gafas y guantes resistentes a químicos, ropa de protección que cubra todo el cuerpo y botas de caucho.
Precauciones ambientales:	Lavar y mezclar con abundante agua. El alto pH silicato es dañino para la vida acuática. Solamente el agua se evaporará del derrame de este material.
Métodos de contención:	Mantener alejadas a las personas innecesarias, aislar el área en peligro y negar la entrada. El



material resulta resbaladizo, no tocar ni caminar sobre el material derramado. Detener el derrame si es posible hacerlo sin riesgo. Prevenir el derrame entre colectores de aguas lluvias o zanjas que conduzcan a vías de agua natural. Aislé presas y material descargado en almacenamiento, si es posible. Use arena o tierra para contener material derramado. Si la contención es imposible, neutralice el área contaminada y limpie con grandes cantidades de agua.

Métodos de limpieza:

Si es posible recoger producto y trasvasar a contenedores adecuados, recogerlo por medios mecánicos, lavar el área contaminada con abundante agua.

Información adicional:

Si no es posible recuperar el producto en contacto con el suelo diluir lo más posible con agua, evitando que el agua vaya a los vertidos.

7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO
Manipulación:

Evite el contacto con los ojos, la piel y la ropa. Mantenga los contenedores cerrados. Rápidamente limpie los residuos de las tapas con un trapo empapado con agua. Inmediatamente limpie las salpicaduras.
 Las soluciones de silicato de sodio se evaporan lentamente cuando son expuestas al aire, así que los tanques deben estar cerrados y ubicados en lugares ventilados.
 El silicato de sodio es un compuesto que reacciona lentamente con el dióxido de carbono presente en el ambiente (aire). Es una sustancia que no reacciona con los materiales comunes. Es una sustancia estable durante su manipulación o transporte.

Almacenamiento:

Mantenga los tanques o envases cerrados. Almacene el silicato en tanques limpios de acero o plástico. Los tanques de aluminio no se recomiendan ya que pueden ser atacados por la alta alcalinidad del silicato.
 Separe de ácidos, metales reactivos y sales de amonio. No almacene en aluminio, fibra de vidrio, cobre, bronce, fluor, zinc, estaño (hojalata) o recipientes galvanizados, por el riesgo de generación de hidrógeno.

8. CONTROLES PARA EXPOSICIÓN/ PROTECCIÓN PERSONAL



Control de Ingeniería:

Use con adecuada ventilación. Mantenga los contenedores cerrados. Se debe tener acceso directo a la ducha lava-ojos y duchas de seguridad.

Límite de exposición:

No ha sido establecido un TLV específico para el producto.

Protección personal:

Cuerpo (traje de goma o neopreno)



Cara (máscara completa facial)



Manos: (guantes de goma o neopreno)



Pies: (botas de goma o de neopreno)



8. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Color:

Incoloro

Olor:

Inodoro

Estado físico:

Líquido

Apariencia:

Líquido viscoso.

pH:

11.8

Inflamabilidad:

No es inflamable

Densidad a 20°C:

1.381g/cm³, 40° Be

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad :

Este material es estable bajo todas las condiciones de



Condiciones que se deben evitar:	almacenamiento y uso.
Materiales Incompatibles:	Ninguna.
Productos peligrosos de descomposición:	Cuando se mezcla con ácidos forma gel y genera calor. Puede reaccionar con sales de amonio provocando formación de gas amoniacal. Gas de hidrogeno combustible puede ser producido en contacto con aluminio, plomo, estaño, y zinc.
Possibilidad de reacciones peligrosas:	No se descompone
Possibilidad de reacciones peligrosas:	No ocurre

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

Toxicidad aguda:	Sin datos toxicológicos. Irritante al tracto respiratorio v
Toxicidad por Ingestión:	Toxicidad agua oral. Rata LD ₅₀ 1500/3200mg/Kg.
Toxicidad crónica:	No se conocen efectos de largo plazo.

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

Estabilidad:	El silicato de sodio es estable y los ensayos de biodegradabilidad no le son aplicables por no ser una sustancia orgánica
Degradabilidad:	No es degradable
Bio-acumulación:	No se produce
Efectos sobre el ambiente:	El anion silicato no se le atribuye ningún efecto nocivo específico. A considerar únicamente una eventual toxicidad a los organismos acuáticos derivada de un aumento del valor del pH de las aguas debido a su alcalinidad. Los silicatos solubles en contacto con aguas naturales pueden reaccionar con los cationes calcio, magnesio, hierro y aluminio etc. dando lugar a compuestos insolubles constituyentes de los suelos naturales

13. CONSIDERACIONES SOBRE DISPOSICIÓN FINAL

Método de eliminación de residuos:	El producto fuera de calidad o desechado debe ser tratado
---	---



como un residuo no peligroso para su eliminación.

Eliminación de envases:

Los envases contaminados de producto deben ser tratados en idénticas condiciones, pudiendo ser eliminados lavándolos con gran cantidad de agua y secados al aire.

14. INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTE

1. Número UN: No asignado.

15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

Ley 769/2002. Código Nacional de Tránsito y Transporte. Artículo 32: La carga de un vehículo debe estar debidamente empacada, rotulada, embalada y cubierta conforme a la normatividad técnica nacional.

Ministerio de Transporte. Resolución No. 3800 del 11 de Diciembre de 1998. Por el cual se adopta el diseño y se establecen los mecanismos de distribución del formato único del manifiesto de carga.

El libro Naranja de las Naciones Unidas (recomendaciones relativas al transporte de mercancías peligrosas) y la Guía de Respuesta a Emergencias GRE versión 2000, NO clasifican el Silicato de Sodio como sustancia o mercancía peligrosa. En virtud de lo anterior, el transporte de Silicato de Sodio no debe cumplir con lo establecido en el Decreto 1609 de 2002 del Ministerio de Transporte.

18. INFORMACIÓN ADICIONAL

Cualquier producto químico puede ser manejado en condiciones seguras, si se conocen sus propiedades físicas y químicas y se utilizan las medidas y prendas de protección adecuadas. Los datos contenidos en esta hoja de seguridad del material, son una guía para el usuario y están basados en informaciones bibliográficas y experiencias propias, intentando reflejar en la misma el estado actual de la técnica pero que, de ningún modo puede comprometer nuestra responsabilidad. Los usuarios deberán cumplir con las disposiciones legales y reglamentos en vigor, en especial todo lo referente a Seguridad y Salud.

ANEXO 5. Ficha técnica hidróxido de sodio.

	FICHA TÉCNICA SODA CAUSTICA 98% ESCAMAS	Código: GT-F-40 Fecha: 01/08/2011
	Versión: 01	Página: 1 de 1

1. DESCRIPCIÓN GENERAL

Nombre químico: Soda caustica 98% escamas.
Otros nombres: Hidróxido de sodio, sosa caustica, hidrato de sodio.
Fórmula Química: NaOH
CAS: 1310-73-2 **UN:** 1823 **Calidad:** Técnica
Descripción: Sólido blanco inodoro en forma de escamas. **Vencimiento:** 5 años.

2. APLICACIONES GENERALES

Se utiliza especialmente en las siguientes industrias:

Obtención de jabones de uso común y metálico "duros". Base de algunas grasas lubricantes convencionales. Obtención de tensoactivos, además en la obtención de carboximetilcelulosa de sodio, celulósicos, hojas y películas celulósicas, rayón, celofán; preparación de emulsiones aniónicas bituminosas y de alquitrán de hulla; preparación de sulfatos, sulfitos y fosfatos de interés industrial, obtención de hipoclorito de sodio.

Acondicionamiento de superficies metálicas, limpieza, desengrasado y decapado industrial; preparación de soluciones desinfectantes y lavadoras, mezclada con compuestos como el metasilicato de sodio; mercerización de fibras naturales, galvanoplastia, industria farmacéutica y de alimentos; plásticos y vidrios; secado y descarbonatación de gases.

3. PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS

Parámetro	unidad	Especificación
Hidróxido de sodio	%	98,0 mín.
Carbonato de sodio	%	0,45 máx.
Sulfato	mg/Kg	4 máx.
Hierro	mg/Kg	10 máx.
Mercurio	mg/Kg	0,05 máx.
Metales pesados	mg/Kg	20 máx.
Calcio	%	0,001 máx.
Plomo	%	0,0002 máx.
Arsénico	mg/Kg	3 máx.

4. CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO Y PRECAUCIONES

Condiciones de almacenamiento: Almacene bajo techo, en lugar fresco, ventilado y con buen drenaje. No almacene este producto junto a materiales de rápida ignición.

Precauciones: La soda cáustica es altamente corrosiva e irritante; por contacto puede producir lesiones oculares, cutáneas, pulmonares y digestivas. La concentración máxima permisible en el aire es de 2 mg/m³ para una exposición máxima de 15 minutos.

Nota: El uso final del producto es responsabilidad directa del cliente, la información consignada en este documento es sólo de carácter ilustrativo y fue tomada de distintas fuentes bibliográficas por nuestro departamento técnico. Estos datos no representan responsabilidad legal alguna y no eximen al comprador de hacer sus propios análisis e investigaciones.

ANEXO 6. Tablas de resultados de resistencia a la compresión

Curado térmico							
Edad (Días)	# de Muestra	1	2	3	4	5	prom
	3	13.63	11.50	11.54	13.26	13.79	12.74
Edad (Días)	14	10.87	11.57	10.72	11.78	11.78	11.34
	28	11.26	8.21	10.46	7.66	9.26	9.37
	56	10.89	10.34	10.16	8.57	8.33	9.66

Curado Ambiental							
Edad (Días)	# de Muestra	1	2	3	4	5	prom
	3	2.21	2.04	2.20	1.97	2.08	2.10
Edad (Días)	14	-	4.65	3.83	4.47	4.45	4.35
	28	6.85	7.12	7.51	6.66	6.47	6.92
	56	7.39	7.82	8.59	8.08	7.37	7.85

Curado por inyección de CO ₂							
Edad (Días)	# de Muestra	1	2	3	4	5	prom
	3	3.22	3.64	3.86	3.76	3.84	3.66
Edad (Días)	16	5.14	5.12	5.17	5.14	5.23	5.16
	29	5.57	5.42	5.15	6.10	6.04	5.66
	57	5.85	5.68	6.33	5.95	6.28	6.02

ANEXO 7. Variación gravimétrica curado térmico.

		Curado térmico																			
# de Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	prom
0	257.7	262.8	266.9	263.4	264.5	253.6	264.0	260.1	256.6	259.6	264.4	276.6	264.3	271.3	269.4	262.3	259.9	263.3	264.9	268.8	263.72
2	227.4	232.2	236.1	232.5	233.0	223.9	233.0	229.8	226.6	228.4	233.1	243.7	232.8	238.6	237.6	231.1	228.7	232.0	233.2	236.4	232.51
3	228.2	232.9	236.7	233.2	233.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	232.96
9	-	-	-	-	-	227.8	237.2	233.5	230.3	232.9	236.8	248.0	236.6	242.3	241.1	235.1	232.7	235.8	237.0	240.3	236.49
14	-	-	-	-	-	229.0	238.5	234.8	231.5	234.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	233.72
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	238.5	249.7	238.5	243.8	242.6	236.4	234.4	237.8	239.3	241.8	240.28
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	240.3	251.5	240.1	245.5	244.5	238.8	236.2	239.3	240.5	243.7	242.04
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	242.1	252.5	241.0	246.6	246.0	-	-	-	-	-	245.64
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	241.6	238.4	241.1	242.2	245.8	241.82
37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	243.4	240.3	243.0	244.9	247.8	243.88
44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	245.1	242.2	245.0	247.6	250.0	245.98
51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	246.9	244.2	246.8	248.9	252.3	247.82
56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	248.1	245.5	248.0	250.0	253.7	249.06

ANEXO 8. Variación gravimétrica curado ambiental.

Curado Ambiental																					
#de Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	prom
0	268.6	266.9	265.9	266.5	265.5	264.8	272.0	267.5	258.1	270.9	257.5	255.6	259.7	263.6	262.7	264.2	261.8	264.5	258.7	261.3	263.82
2	267.3	265.6	264.5	265.7	264.3	263.4	270.8	266.8	257.2	269.7	256.3	254.6	258.7	262.4	261.3	263.1	260.5	263.3	257.4	259.8	262.64
3	267.0	265.4	264.7	265.4	264.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	265.36
9	-	-	-	-	-	263.6	271.2	266.5	257.2	269.9	256.6	254.4	258.7	262.4	261.4	263.2	260.4	263.2	257.4	259.9	261.73
14	-	-	-	-	-	263.7	271.2	266.6	257.4	270.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	265.80
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	257.0	254.8	259.2	262.8	261.8	263.7	261.0	263.8	257.9	260.5	260.25
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	257.8	255.8	260.0	263.6	262.7	264.7	262.1	264.8	258.9	261.6	261.20
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	258.4	256.3	260.6	264.3	263.2	-	-	-	-	-	260.56
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	265.3	262.6	265.4	259.6	262.2	263.02
37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	265.6	262.8	266.0	259.8	262.3	263.30
44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	265.7	262.8	265.8	259.9	262.4	263.32
51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	265.9	262.9	266.0	260.0	262.5	263.46
56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	265.9	263.0	266.0	260.0	262.5	263.48

ANEXO 9. Variación gravimétrica curado por carbonatación de CO₂.

Curado por inyección de CO ₂																					
# de Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	prom
0	259.6	265.4	262.5	258.2	264.1	273.7	264.8	269.2	270.3	266.4	262.9	266.3	259.2	267.8	259.4	259.0	254.3	257.7	260.2	266.1	263.36
2	255.1	261.1	258.6	253.7	259.3	268.9	260.8	265.3	265.1	262.4	258.8	260.7	255.0	263.1	255.4	254.1	249.3	252.4	256.5	260.4	258.80
3	254.6	260.4	257.9	253.2	258.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	256.98
9	-	-	-	-	-	269.1	260.8	265.7	265.5	262.6	259.0	262.0	255.3	263.6	255.2	255.3	250.2	252.7	256.4	260.7	261.73
16	-	-	-	-	-	269.9	261.8	266.4	266.5	263.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	265.68
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	259.8	263.1	256.2	264.7	256.1	255.9	251.2	253.7	257.2	261.4	257.93
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	256.9	252.3	255.0	258.4	262.6	261.0	264.2	257.3	265.9	257.5	259.11
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	262.1	265.4	258.5	267.0	258.4	-	-	-	-	-	262.28
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	258.3	253.7	256.5	259.7	263.8	258.40
37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	258.8	254.2	257.2	260.4	264.8	259.08
44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	259.0	254.3	257.3	260.5	265.2	259.26
51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	259.0	254.3	257.3	260.5	265.2	259.26
57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	259.0	254.4	257.3	260.5	265.2	259.28

ANEXO 10. Variación volumétrica curado térmico.

		Curado térmico																			
# de Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	prom
0	125.68	129.09	129.85	128.60	128.85	123.84	129.50	127.18	124.96	127.11	128.02	135.30	128.63	133.16	132.34	129.24	126.50	128.30	128.33	130.01	128.72
2	123.01	127.97	127.17	125.84	125.77	121.08	127.76	124.56	122.68	124.64	126.93	133.10	126.35	132.38	130.24	125.87	124.20	127.03	126.43	127.87	126.54
3	123.01	127.10	126.97	126.17	125.39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	125.73
9	-	-	-	-	-	123.50	127.01	124.44	122.78	124.42	126.00	134.02	125.85	131.33	130.17	124.62	126.00	126.88	126.98	129.68	126.91
14	-	-	-	-	-	120.99	127.52	124.64	122.56	125.09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	124.16
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	126.48	134.09	125.72	131.23	129.05	124.77	125.14	127.26	127.72	128.22	127.97
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	125.80	133.90	125.82	131.51	129.91	124.65	125.64	126.90	127.26	128.07	127.95
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	125.15	134.77	125.92	131.54	130.09	-	-	-	-	-	129.49
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	124.72	124.87	126.63	127.18	127.81	126.24
37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	125.10	125.49	126.20	127.36	127.84	126.40
44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	124.92	125.19	127.26	126.88	128.37	126.53
51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	125.02	125.21	126.71	127.01	127.46	126.28
56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	125.42	125.04	126.60	127.16	127.99	126.44

ANEXO 11. Variación volumétrica curado ambiental.

		Curado Ambiental																			
# de Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	prom
0	130.20	129.39	127.74	128.98	128.37	128.50	132.86	130.84	125.70	130.98	124.65	123.03	124.79	128.22	127.88	127.25	126.09	127.33	124.42	126.13	127.67
2	129.44	128.77	129.18	128.31	128.44	127.77	131.69	132.37	124.62	130.14	124.50	123.06	124.52	127.23	127.00	126.63	125.58	126.50	123.70	125.75	127.26
3	129.25	129.00	126.78	128.25	128.45																128.35
9	-	-	-	-	-	127.87	131.92	130.66	125.00	130.71	124.00	122.34	123.97	127.15	127.23	127.77	125.11	126.22	123.72	125.85	126.63
14	-	-	-	-	-	127.67	132.13	130.50	124.65	129.37											128.86
16	-	-	-	-	-						124.35	122.00	124.84	127.21	126.25	126.96	125.71	126.42	123.84	125.43	125.30
23	-	-	-	-	-						124.22	122.59	124.40	127.63	127.73	126.96	126.68	126.54	124.24	127.03	125.80
28	-	-	-	-	-						124.52	121.78	124.31	127.13	127.62						125.07
30	-	-	-	-	-											127.24	125.65	126.45	127.01	127.46	126.76
37	-	-	-	-	-											126.91	125.49	126.25	123.62	125.65	125.58
44	-	-	-	-	-											127.29	125.93	126.88	124.42	126.50	126.20
51	-	-	-	-	-											127.16	125.46	126.65	124.17	126.02	125.89
56	-	-	-	-	-											127.65	125.56	126.60	123.65	126.25	125.94

ANEXO 12. Variación volumétrica curado por carbonatación de CO₂.

Curado por inyección de CO ₂																					
# de Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	prom
0	125.59	128.24	127.56	125.12	127.61	132.33	128.76	130.60	130.36	131.83	127.06	129.33	125.96	130.41	126.13	126.44	124.36	126.02	128.15	130.38	128.11
2	124.02	127.50	126.12	123.92	126.68	130.78	127.77	129.58	130.15	128.15	126.23	153.03	124.02	129.61	125.32	125.29	123.45	124.11	127.19	128.01	128.05
3	124.30	127.18	127.62	124.32	126.78																126.04
9	-	-	-	-	-	130.78	127.16	128.43	129.40	127.69	126.38	127.04	124.63	128.63	124.47	124.46	123.52	123.85	126.31	127.27	126.67
16	-	-	-	-	-	132.34	127.74	129.65	129.62	127.97											129.46
16	-	-	-	-	-						126.38	128.19	125.62	129.29	125.05	125.02	123.69	124.40	126.81	129.21	126.37
23	-	-	-	-	-						125.46	123.59	124.91	127.07	130.54	125.72	128.08	124.48	128.91	124.87	126.36
29	-	-	-	-	-						126.43	127.44	124.76	129.24	124.85						126.54
30	-	-	-	-	-											125.81	123.49	124.78	126.94	129.61	126.13
37	-	-	-	-	-											125.89	124.09	124.49	127.02	128.48	125.99
44	-	-	-	-	-											125.72	123.29	125.38	128.29	128.98	126.33
51	-	-	-	-	-											125.92	123.24	125.46	127.90	128.56	126.22
57	-	-	-	-	-											125.52	123.64	126.24	128.04	131.19	126.93